高等学校教材

普通物理实验

（二、电磁学部分）

第三版

杨述武　主编

杨介信　陈国英　编





高等教育出版社

高 等 学 校 教 材

普通物理实验

（二、电磁学部分）

第三版

杨述武　主编

杨介信　陈国英　编

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验(2):电磁学部分/杨述武主编. —3版. —北京:高等教育出版社,2000(2001重印)

高等学校教材

ISBN 7-04-007946-1

Ⅰ.普… Ⅱ.杨… Ⅲ.①物理学-实验-高等学校-教材 ②电磁学-实验-高等学校-教材 Ⅳ.04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第67323号

普通物理实验(二、电磁学部分) 第三版

杨述武 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号 邮政编码 100009

电 话 010-64054588 传 真 010-64014048

网 址 http://www.hep.edu.cn

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 850×1168 1/32 版 次 1985年10月第1版

印 张 10.375 2000年5月第3版

字 数 250 000 印 次 2001年1月第2次印刷

定 价 10.20元



内容提要

《普通物理实验》一套共4册，分别为力学及热学部分，电磁学部分，光学部分，综合及设计部分，是在第2版前3册的基础上增订而成的. 全书保持了原书通用性好、可读性强及注重能力培养的特色. 同时，为了更好地适应教学需要，修改了前3册部分实验的论述；并增加了第4分册，专门推出一批较成熟、易推广的综合及设计性实验. 本次修订时还改正了原书中的一些错误，并根据最新的有关国家标准和规范统一了有关名词、单位和符号，从而使全书更加科学化和规范化.

本书是这套书的第2分册，为电磁学部分，共计29个实验. 可作为高等学校本科物理及相近专业普通物理实验课的教材，也可供师专及卫电使用.

第三版前言

本书自1990年修订之后,发现有些地方修订不细,承高等教育出版社大力协助,又进行了一次修订工作.主要工作有:

1. 根据全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词(1996)》订正、统一了有关名词;

2. 对测量的评定,一律改用"标准不确定度";

3. 修改了一部分实验的论述,订正了发现的错误.

我们感谢读者给予的支持,希望读者继续对本书提出批评和建议.

编　者

1997年秋

第二版前言

本书是在第一版的基础上，参照1989年国家教委高等学校理科物理学教材编审委员会物理实验编审小组拟订的"综合大学、师范院校普通物理实验教学基本要求"(由国家教委高教司颁发，供试行. 见(89)教高司字122号文)组织修订的.

本书共收入29个实验，比第一版增加了5个实验，其中2个是基本电路实验，3个是实用性的实验.

本书在原有基础上着重考虑了以下几点：

1. 增强通用性

尽量使本书适应不同规格的仪器；

处理数据的方法不作统一规定，例如研究二物理量之间的关系，既可以用图解法，也可以用线性回归法或其它计算方法，我们希望学生能熟悉各种处理方法.

2. 增进易读性

适当删减字数，减少学生的阅读时间；

在原理部分增加些小标题，使学生阅读时容易抓住中心问题.

3. 加强手、脑并用的训练

注意加强动手训练；

努力使学生在动手操作时，增加分析的内容，而不是给学生一套操作指令.

本书的修订工作是在山东大学孟尔熹同志的倡议下，在高等教育出版社曹建庭同志的大力支持下进行的，东北师大赵元良同志对本书的修订提出了宝贵的意见. 我们在修订此书时，着重参考了以下几本实验书：

贾玉润、王公治、凌佩玲主编，《大学物理实验》，复旦大学出版社，1987；

孟尔熹主编,《普通物理实验》,山东大学出版社,1988;

苏登记编著,《大学物理实验指南(电磁学分册)》,厦门大学出版社,1989;

赵元良编著,《普通物理实验(电磁学部分)》,东北师大校内教材,1990.

我们对鼓励和支持本书修订工作的各位同志致以衷心的感谢.

由于作者的水平和教学经验所限,修订本中不免有缺点和错误,请各位指导教师和同学批评指正.

编　者

1991年春

致学生读者

1. 你们已经做了力学和热学实验，有过成功的喜悦，也可能有过失败的苦恼，现在要开始做可能使你们更感兴趣的电磁学实验，因此应当回顾一下在过去的实验中为了做好实验是如何做的.

2. 做电磁学实验，电路的设计与分析是很重要的，应明确电路中各部分的作用，选用合适的仪器，防止接线出错. 要注意，就是在最简单的电路——制流电路和分压电路的安排中，也时常会出错.

3. 调节仪器是很好的训练，要想调得既快又好，需有较高的操作技能，还要会分析.

4. 在实验中遇到故障时应在切断电源后审查:

(1) 电路设计正确否?

(2) 实际电路与电路图一致否? 例如在仪器的安排方面，接线特别是滑线变阻器的接线方面，两者是否一致.

(3) 仪器的功能、量限合适否?

(4) 参量的选择合适否? 等等.

分析故障并予以排除是培养分析能力的好机会，不要轻易求助别人.

5. 学习实验的最终目的是能独立做实验，这包括方案设计、仪器选择、步骤安排、参量选取、故障分析、数据处理和结果评论等方面，但这些方面的训练并不是通过某一个(或每一个)实验全面进行的，而是在每次实验中对其中某一方面做些探索.

6. 要牢记电磁学实验操作规程，养成科学的工作习惯.

电磁学实验操作规程

1. 联接电路时，必须有规整的电路图，对电路各部分的作用应明确，对电路中电源、仪器、电表及其他器具的规格应预先定好.

2. 选择出合用的仪器及用具，参照电路图将它们分布到实验台上，注意安全并能很方便地进行观察、操作和读数.

3. 对多功能、多量程的仪表，要调到合用的功能状态和量限，对灵敏度可调的仪器要先调到灵敏度最低的状态.

4. 联线时，应将电路分为主回路和支路，从电源一端开始沿主回路按顺序进行，其次为支路；主回路中必需有开关（先断开！）；导线最好有几种颜色的，主、支回路分别用一种颜色.

5. 往接线柱上接导线时，应按顺时针方向将导线缠上.

6. 电路联接后，必须认真复查，可请指导教师检查，但是要确信自己所联电路是正确的，绝对不允许未经仔细审查电路就通电试试看！

7. 实验中途调换仪器、仪器换档、改变量程、改变接线，都要先切断电源.

8. 实验仪器显示任何不正常，都要先切断电源.

9. 实验结束时，将仪器调到最安全的状态再切断电源，如果时间容许应审查记录，看是否有漏测或错误，最后拆除联线，整理好仪器和导线.

目　录

绪　论

§1　测量数据处理的基本问题

物理实验中对一物理量进行测量的主要目的是:(1)获得被测量的最可信赖值;(2)对最可信赖值的可靠性作出估价,即给出被测定量的真值在某个量值范围的一个评定.有关在普通物理实验范围内的数据处理理论及方法,已在《普通物理实验(一、力学、热学部分)》中有过介绍,在此只作必要的摘记与补充.

1. 直接测量

设 x_1、x_2、…、x_n 为某一物理量 X 的 n 个等精度测量值,则可按以下顺序处理数据.

(1) 求算术平均值 $\bar{x}$

$$\bar{x}=\Sigma x_i/n \qquad (0-1-1)$$

(2) 计算测量列标准偏差 s

$$s=[\Sigma(x_i-\bar{x})^2/(n-1)]^{1/2} \qquad (0-1-2)$$

(3) 剔除坏数据(格罗布斯判据)

当某一测量值 x_k 满足下列关系时,可认为是坏数据而剔除

$$x_k<\bar{x}-G_n\cdot s \quad 或 \quad x_k>\bar{x}+G_n\cdot s \qquad (0-1-3)$$

式中 G_n 为格罗布斯判据系数.各 n 值的 G_n 值见下表.

(4) 剔除坏数据后,再求平均值 $\bar{x}$、测量列标准偏差 s 及平均值标准偏差 $s(\bar{x})$.

$$s(\bar{x})=s/\sqrt{n} \qquad (0-1-4)$$

格罗布斯判据系数表

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G_n	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.29
n	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30
G_n	2.33	2.37	2.41	2.48	2.47	2.50	2.53	2.56	2.66	2.74

(5) 一般取剔除坏数据后的算术平均值为真值的最佳估计值. 当测量值中某项系统误差 ζ 的符号与大小已知时,则取其符号相反值($-\zeta$)为修正值,平均值加修正值为被测量 X 的真值的最佳估计值,即

$$X=\bar{x}+(-\zeta) \qquad (0-1-5)$$

(6) 直接测量的不确定度

测量的理想是获得被测量在测量条件下的真值,但是由于测量时不可避免的误差,测量结果将偏离真值. 因为测量结果是真值的近似值,所以应给出此近似值可靠程度的评价,测量不确定度就是此评价的指标.

测得值不等于真值,可以设想真值就在测得值附近的一个量值范围内,测量不确定度就是评定此量值范围. 设测得值为 x,其测量不确定度为 $u(x)$,则真值可能在量值范围$[x-u(x), x+u(x)]$之中. 显然,不确定度 $u(x)$越小,此量值范围就越窄,用此测得值 x 作为真值的估计值就越可靠.

对测量不确定度的评定,常以估计标准偏差去表示大小,这时称其为标准不确定度.

测量误差有偶然误差和系统误差,对其评定方法也不同.

① A 类标准不确定度的评定　这是针对偶然误差的,当求出被测量 X 的平均值标准偏差$s(\bar{x})$

$$s(\bar{x})=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n\cdot(n-1)}}$$

则 A 类标准不确定度 $u_A(x)$等于算术平均值标准偏差,即

$$u_A(x)=s(\bar{x}) \qquad (0-1-6)$$

按误差理论的高斯分布,如果不存在其它误差,则量值范围$[\bar{x}-u(x),\bar{x}+u(x)]$中包括真值的概率为68%. 如扩大量值范围为$[\bar{x}-1.96u(x),\bar{x}+1.96u(x)]$,则其中包括真值的概率为95%,此时$1.96u(x)$称为置信概率95%的不确定度.

② B类标准不确定度的评定　这是针对系统误差的,B类评定,有的依据仪器说明书或检定书,有的依据仪器的准确度等级,有的则粗略的依据仪器的分度值或经验,从这些信息可以获得该项系统误差的极限值Δ(有的标出容许误差或示值误差),对此误差,一般按误差理论的均匀分布处理,其标准差为$\Delta/\sqrt{3}$,则B类标准不确定度$u_B(x)$取为

$$u_B(x)=\frac{\Delta}{\sqrt{3}} \tag{0-1-7}$$

但实际上该项误差的分布可能不是严格的均匀分布,那时上式中的换算系数将和$\sqrt{3}$不同,在此是近似的处理.

例如,使用一准确度等级为0.5级,量程0～100 mA的电流计测一电路的电流强度I,则由电流计的基本误差引入的I的标准不确定度就是B类评定,$\Delta=0.5\%\times100$ mA,则

$$u_B(I)=(0.5\%\times100)\ \text{mA}/\sqrt{3}=0.29\ \text{mA}$$

③ 合成标准不确定度$u_c(x)$

被测量x不确定度的A类评定或B类评定,均为所求不确定度的一部分,最后要合并为合成标准不确定度。参加合成的标准不确定度,不论来自A类评定还是B类评定,都是等价的,设要合成的标准不确定度有k项,用方和根方式合成,即

$$u_c(x)=\sqrt{\sum_{i=1}^{k}u^2(x_i)} \tag{0-1-8}$$

2. 间接测量

(1) 真值的最佳估计值　设$y=y(x_1,x_2,\cdots,x_m)$,即间接测量值y是由m个直接测量值求出,则y的最佳估计值取为

$$y=y(\bar{x}_1,\bar{x}_2,\cdots,\bar{x}_m)$$

(2) 不确定度的合成传递(合成)　已知 $y=y(x_1,x_2,\cdots,x_m)$,又设 $x_1,x_2,\cdots,x_m$ 的标准不确定度为 $u(x_1),u(x_2),\cdots,u(x_m)$,则不确定度传递公式,或 y 的合成标准不确定度为

$$u_c(y)=\sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}u(x_1)\right)^2+\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}u(x_2)\right)^2+\cdots+\left(\frac{\partial y}{\partial x_m}u(x_m)\right)^2} \tag{0-1-9}$$

对幂函数 $y=Ax_1^a\cdot x_2^b\cdots x_m^k$,$A$ 为无量纲量,则为

$$u_c(y)=y\sqrt{\left(a\frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2+\left(b\frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2+\cdots+\left(k\frac{u(x_m)}{x_m}\right)^2} \tag{0-1-10}$$

3. 非等精度测量值的综合

当待测量是用不同方法或不同准确度仪器测得的,这些测量值为非等精度测量值,从这些测量值求最可信赖值,要用加权平均. 设 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 的权分别为 $p_1,p_2,\cdots,p_n$,则加权平均为

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}p_ix_i}{\sum_{i=1}^{n}p_i} \tag{0-1-11}$$

参照式(0－1－9),可得加权平均 $\bar{x}$ 的标准不确定度合成公式为

$$u(\bar{x})=\left[\left(\frac{p_1}{\Sigma p_i}\right)^2u^2(x_1)+\left(\frac{p_2}{\Sigma p_i}\right)^2u^2(x_2)+\cdots+\left(\frac{p_n}{\Sigma p_i}\right)^2u^2(x_n)\right]^{1/2}=\left[\frac{\Sigma p_i^2u^2(x_i)}{(\Sigma p_i)^2}\right]^{1/2}$$

理论分析可知,权 p_i 与其相应标准不确定度的平方成反比,因此上式可写成

$$u(\bar{x})=\left[\frac{\Sigma\left(\frac{1}{u^2(x_i)}\right)^2u^2(x_i)}{\left(\Sigma\frac{1}{u^2(x_i)}\right)^2}\right]^{1/2}=\left[\frac{1}{\Sigma\frac{1}{u^2(x_i)}}\right]^{1/2} \tag{0-1-12}$$

例：已知同一个电阻的三种(或三组)测量结果值：

$$R_1=(350\pm1)\ \Omega$$

$$R_2=(350.3\pm0.2)\ \Omega$$

$$R_3=(350.25\pm0.05)\ \Omega$$

(表示式中“±”符号后是标准不确定度.)

求：电阻的平均值 $\bar{R}$ 及其标准不确定度 $u(\bar{R})$.

解：根据 p_i 与 $u^2(R_i)$成反比,有

$$p_i=k/u^2(R_i)$$

式中 k 为比例常数. 由给定的测量结果可以得到

$$p_1:p_2:p_3=k/u^2(R_1):k/u^2(R_2):k/u^2(R_3)=k:25k:400k$$

若取 $k=1$,则各权之比就是最简单的整数比,即 $p_1=1,p_2=25$, $p_3=400$,由(0-1-11)和(0-1-12)式可以求得 $\bar{R}$ 和 $u(\bar{R})$.

$$\bar{R}=\frac{1\times350+25\times350.3+400\times350.25}{1+25+400}=\frac{149\ 208}{426}$$

$$=350.25$$

$$u(\bar{R})=\frac{1}{\sqrt{\sum\frac{1}{u^2(R_i)}}}=\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1}+\frac{1}{0.2^2}+\frac{1}{0.05^2}}}=0.048=0.05$$

最后结果

$$R=(350.25\pm0.05)\ \Omega$$

注意：k 取任意值对计算结果没有影响,但 k 取得合适时,计算就比较简单,并且各种测量值的权都是简单的正整数.

§2 二个变量关系的研究——作图法

研究二个变量的关系就是用曲线或函数式将二个变量的联系

表现出来．对于如何作图已在力学实验中讨论过，在此仅讨论变量间的函数关系．这类问题有两种不同的情况：

(1) 已知二个变量函数关系的形式，但是其中有未知参量；

(2) 二个变量函数关系的形式尚未知．

现在分别就这两种情况进行讨论．

A. 二个变量函数关系的形式已知时

如果二个变量 x、y 间是直线关系，即

$$y = a + bx \tag{0-2-1}$$

则可用 n 组测量值(x_i, y_i)作图，所得直线的截距即参量 a，而斜率是参量 b.

但是，实验中二个变量的关系往往不是直线关系，例如，弹簧振子的振动周期 T 和所加负载 m 的关系为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m + cm_0}{k}}$$

式中 m_0 为弹簧自身的质量，π 为圆周率，c 和 k 为待定参量．测量不同 m 对应的 T，可以作 $T-m$ 图线，图 0-2-1 为其一例．由于它是曲线，因而无法从图上得出待定参量值．类似这种情况，可以设法改换变量，将函数关系转变为直线关系，对此周期公式可以改成为

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2 cm_0}{k}\right) + \left(\frac{4\pi^2}{k}\right)m$$

它表示 T^2 和 m 间为直线关系．即作 $T^2 - m$ 直线(图 0-2-2)，从图上求出截距 a，斜率 b，则

$$a = \frac{4\pi^2 cm_0}{k}$$

$$b = \frac{4\pi^2}{k}$$

由此可求出 k 和 c 之值(m_0、π 为已知)．

即对于非线性函数，要通过变换变量使之成为线性函数，再用

作图法求出截距和斜率，进而确定待定参量.

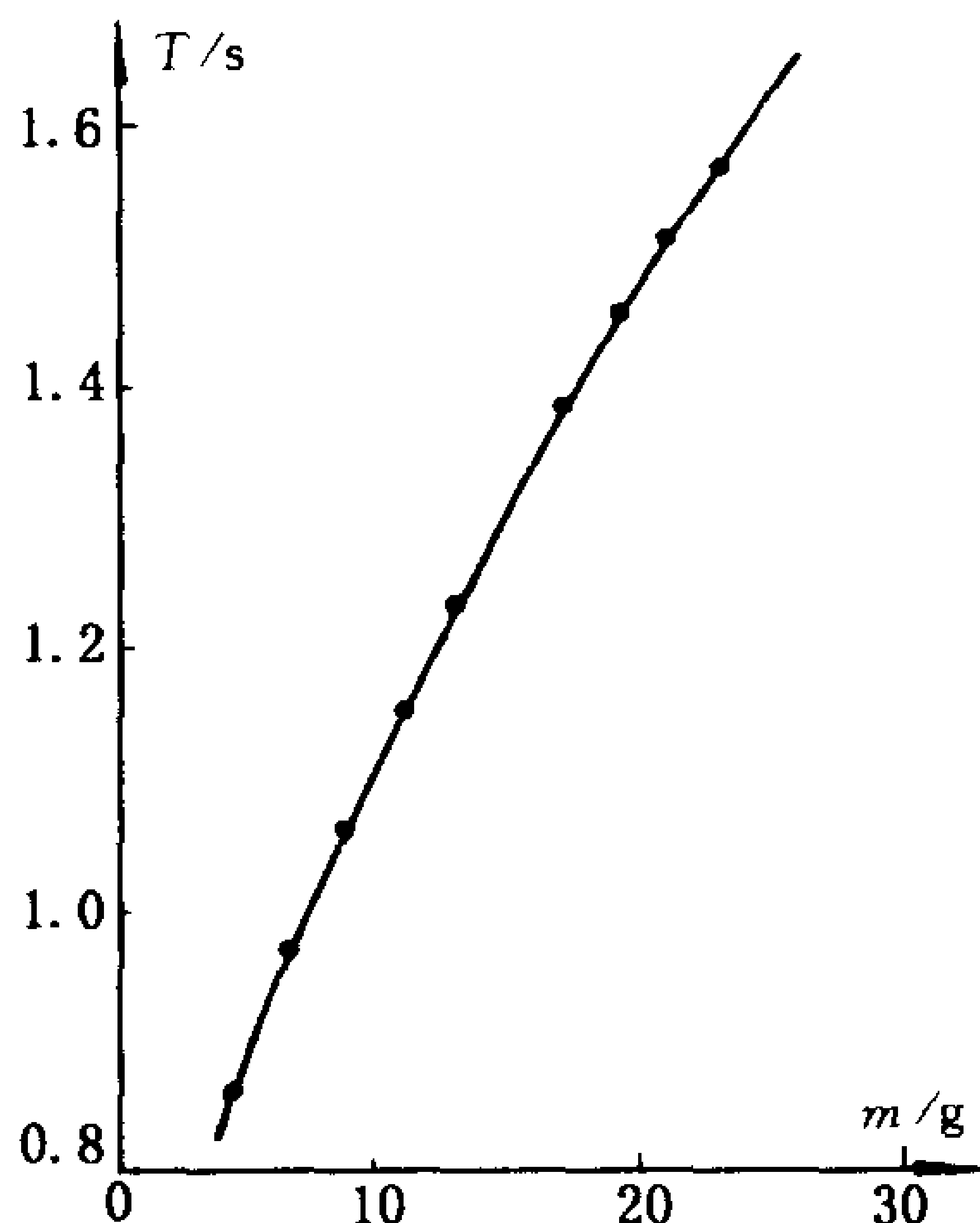


图 0-2-1

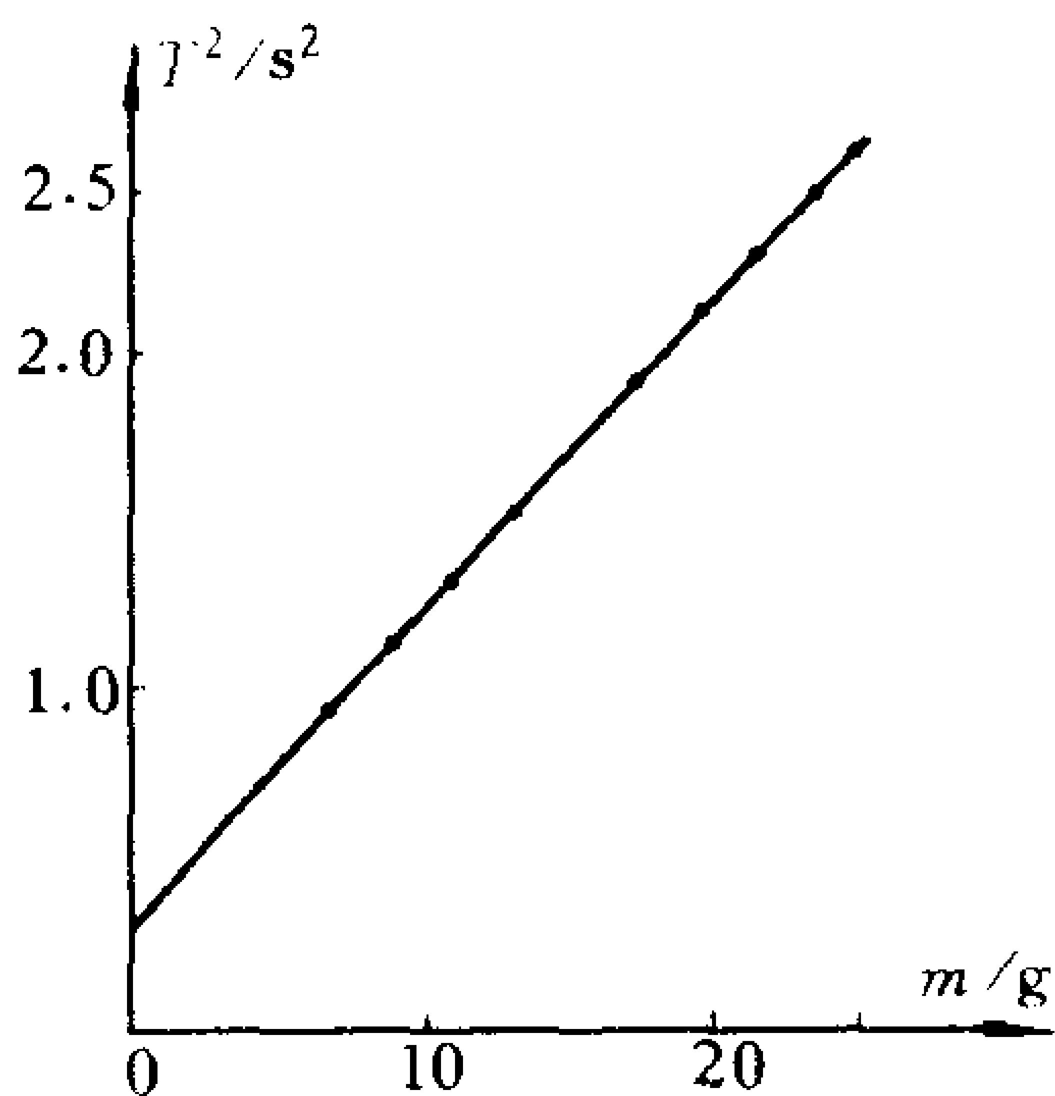


图 0-2-2

实际的非线性函数如何变换要看函数的形式，例如

$$y = ae^{-bx} \cdots\cdots\cdots [\ln y] = \ln a - b[x]$$

$$y = R\frac{E-x}{x} \cdots\cdots\cdots [y] = -R + R \cdot E\left[\frac{1}{x}\right]$$

$$y = ax^b \cdots\cdots\cdots [\ln y] = \ln a + b[\ln x]$$

$$y = ax + bx^2 \cdots\cdots\cdots \left[\frac{y}{x}\right] = a + b[x]$$

上列式中的括号[　]为变换后的变量.

B. 二个变量的函数关系形式尚未知时

首先用测量值作图，如果得一直线，则从图上求出截距和斜率，函数关系就完全确定了；当得到的是曲线时，就要分析曲线的形式，参照已知的函数曲线(如图 0－2－3)，给出假定的函数式，再用上述 A 中处理非线性函数的方法，使之线性化，但这样做不一定一次就成功，可能要反复几次才可得出较好的结果. 下面举一例对此过程作些说明.

$y=ae^{-b/x}$	$y=ax^{b}(b>0)$	$y=ax^{-b}$
$y=2\pi\sqrt{\frac{c^2+k^2}{xg}}$	$y=ae^{b/x}(b>0)$	$y=ae^{bx}(b>0)$
$(x-f)(y-f)=k$	$f=\frac{y^2-x^2}{xy}$	$y=ae^{-bx}+c \quad (b>0)$
$y=2\pi\sqrt{\frac{x+s/3}{kg}}$	$y=\mathrm{arctg}\frac{Lx-\frac{1}{cx}}{R}$	$y=ae^{-bx}(b>0)$

图0-2-3

研究某铁铝合金的磁致伸缩现象时，测得样品的相对伸长($\Delta l/l$)与建立外磁场的电流(I)有如下表的数据记录. 试寻找$\Delta l/l$与I的经验公式(即$\Delta l/l$与I的数学关系式).

I/A	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
$\frac{\Delta l}{l}\times 10^{-6}$	0.81	4.63	9.84	15.22	19.93	23.92
I/A	0.70	0.80	0.90	1.00	1.50	2.00
$\frac{\Delta l}{l}\times 10^{-6}$	26.85	29.62	30.92	32.71	36.94	38.32
I/A	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
$\frac{\Delta l}{l}\times 10^{-6}$	39.22	40.19	40.60	41.08	41.33	41.82

根据实验数据，取I/A为横坐标，$\frac{\Delta l}{l}\times 10^{-6}$为纵坐标作磁场电流与相对伸长的关系曲线，如图0－2－4所示. 由图可知，它们不是线性关系，按曲线的变化规律，参照图0－2－3所示的函数对应关系可写出数学关系式：

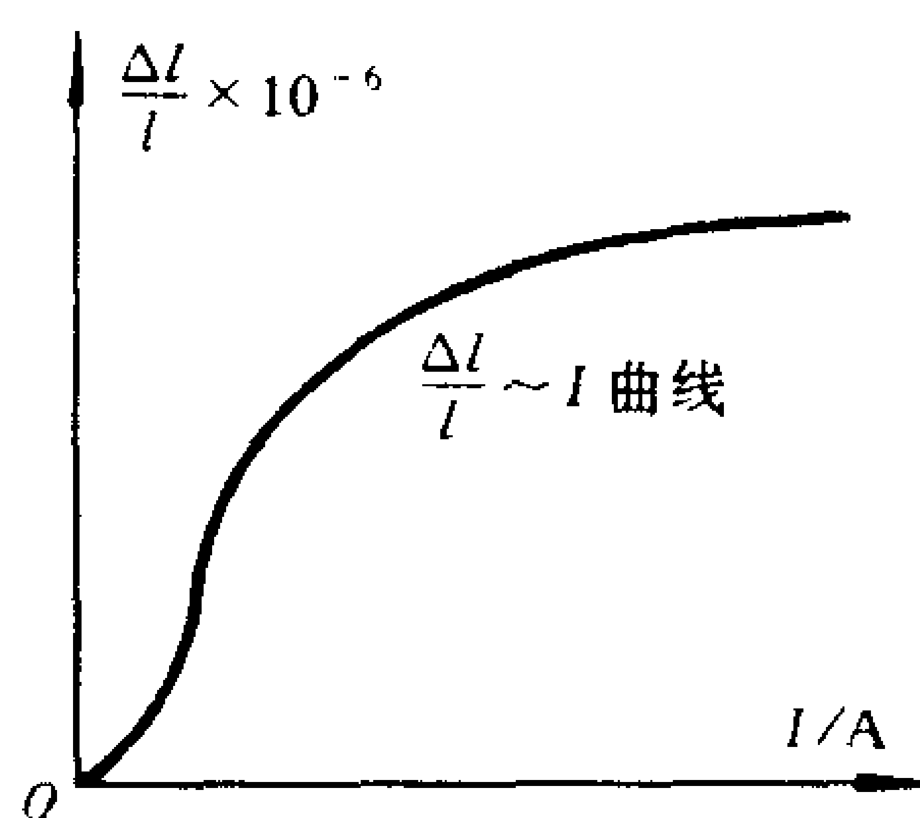


图0－2－4　磁化电流与相对伸长的关系曲线

$$\frac{\Delta l}{l}=\alpha \mathrm{e}^{-\frac{\beta}{I}}$$

式中α、β是待定常量，经过线性变换，上式成为

$$\ln\frac{\Delta l}{l}=\ln\alpha-\beta\left(\frac{1}{I}\right)$$

显而易见，如果$y=\ln\frac{\Delta l}{l}$，$x=\frac{1}{I}$，$a=\ln\alpha$，$b=-\beta$，作$y-x$曲线，那么将得到一条不通过坐标原点的倾斜直线.

图0－2－5画出了y与x的关系曲线，确实可用一条直线代替，其中$x=10.0$，$y=-0.21$点偏离直线较远，因此可考虑它带有粗差，予以剔除，回归线的截距$a=3.88$，其斜率

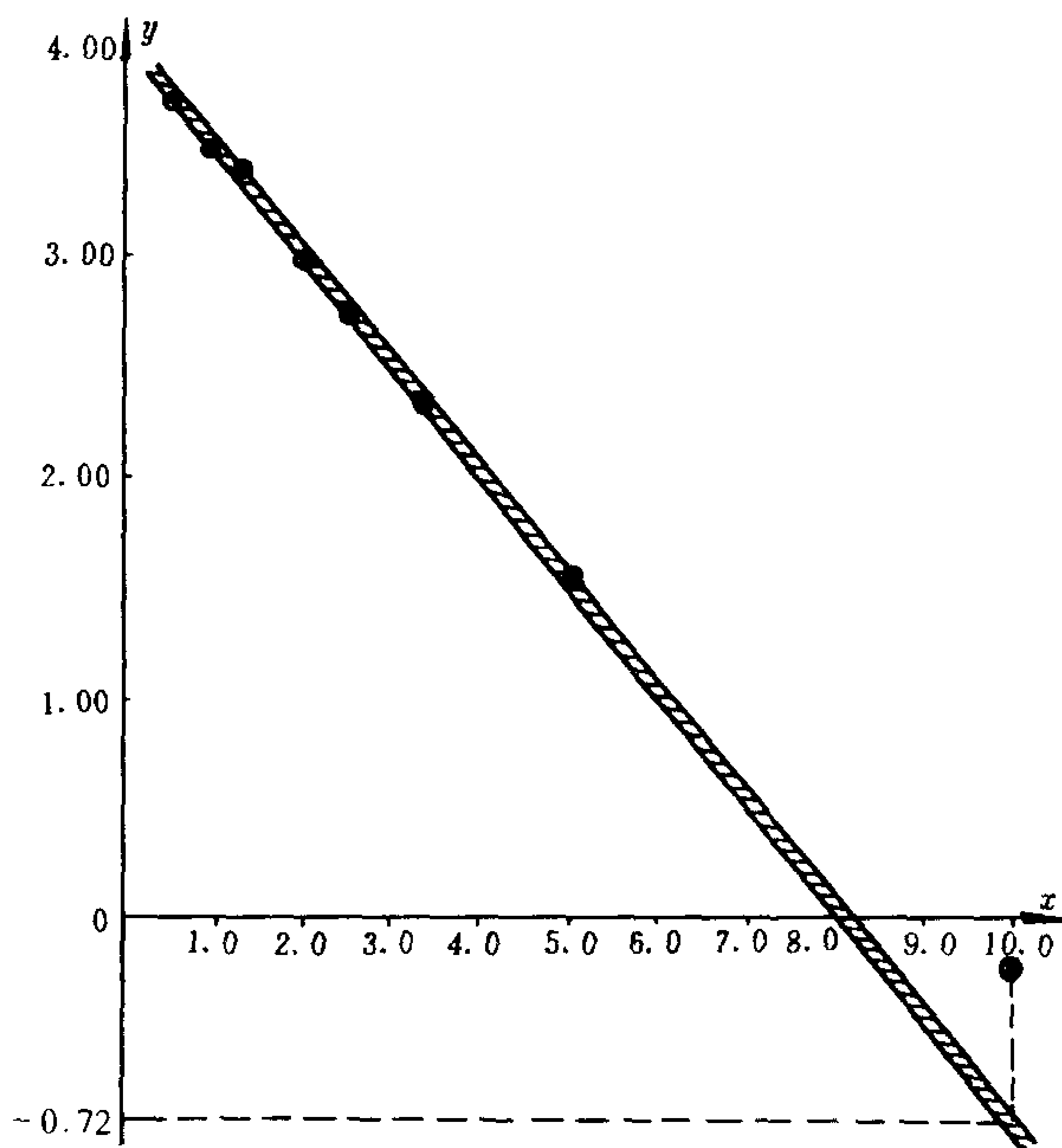


图 0-2-5 某铁铝合金的回归直线

$$b=\frac{-0.729-3.88}{10.0}=-0.461$$

由于 $a=\ln\alpha, b=\beta$,所以 $\alpha=48.6, \beta=-0.461$,则该合金的磁致伸缩规律可用如下的经验公式表示:

$$\frac{\Delta l}{l}=48.6\exp\left(-\frac{0.461}{I}\right)\times10^{-6}$$

在测量的精确度不很高的实验里,例如 2~3 位有效数字的测量要求,作图既可直观了解测量的全貌,又可方便地得到测量值或间接测量值的大小. 对于更高精密度的变量间关系的研究,可采用最小二乘法.

§3　二个变量线性关系的研究

——分组计算法

设变量 x、y 间存在 $y=a+bx$ 的直线关系，由于测量存在误差，对 n 次测量则有

$$\left.\begin{array}{l} y_1=a+bx_1+v_1 \\ y_2=a+bx_2+v_2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_n=a+bx_n+v_n \end{array}\right\} \qquad (0-3-1)$$

式中 v_i 表示测量误差. 现在将 n 组测量分为前后两部分，从中取对应的两组：

$$\left.\begin{array}{l} y_i=a+bx_i+v_i \\ y_{i+\frac{n}{2}}=a+bx_{i+\frac{n}{2}}+v_{i+\frac{n}{2}} \end{array}\right\} \qquad (0-3-2)$$

略去误差项，解出 a、b 的近似值：

$$\left.\begin{array}{l} b_i=\dfrac{y_{i+\frac{n}{2}}-y_i}{x_{i+\frac{n}{2}}-x_i} \\ a_i=\dfrac{\left(y_{i+\frac{n}{2}}+y_i\right)-b_i\left(x_{i+\frac{n}{2}}+x_i\right)}{2} \end{array}\right\} \qquad (0-3-3)$$

这样可得 $\frac{n}{2}$ 个 a_i 和 b_i，再求 $\bar{a}$、$s(\bar{a})$ 和 $\bar{b}$、$s(\bar{b})$. 如 n 为奇数，中间数可公用.

例如

x	1.43	2.45	3.06	4.10	5.33	6.51	7.86	8.77
y	19.0	22.8	29.0	37.7	44.4	54.0	61.4	72.3

计算出

a	9.687	3.972	8.345	7.323
b	6.513	7.685	6.750	7.409

最后求出

$$\hat{a}=7.3\pm1.2$$

$$\hat{b}=7.09\pm0.27$$

对于非线性函数可参照§2中的讨论,先将其作线性化处理.

§4　二个变量关系的研究

——最小二乘法

假设变量 x,y 间存在直线关系 $y=a+bx$,参量 a、b 分别为 y 轴截距和斜率,当将测量值(x_i,y_i)代入此式时,由于存在测量误差(现在认为 x 的误差可略去)$y_i\neq a+bx_i$,引入误差项 v_i 后有

$$y_i=a+bx_i+v_i \tag{0-4-1}$$

或
$$v_i=y_i-(a+bx_i)$$

对 n 次测量,可有

$$\left.\begin{aligned}v_1&=y_1-(a+bx_1)\\v_2&=y_2-(a+bx_2)\\&\cdots\cdots\cdots\cdots\\v_n&=y_n-(a+bx_n)\end{aligned}\right\} \tag{0-4-2}$$

由于 n 个方程中有 $n+2$ 个未知数($a,b,v_1,v_2,\cdots,v_n$),所以不能从解联立方程组求出 a,b 值. 设 y 为等精度测量值,最小二乘原理指出,满足 $\Sigma v_i^2=$极小条件下求出的参量 a、b 之值 $\hat{a}$、$\hat{b}$ 为最佳拟合值,

即从
$$\Sigma v_i^2=\Sigma[y_i-(a+bx_i)]^2$$

$$\frac{\partial\Sigma v_i^2}{\partial\hat{a}}=0,\qquad\frac{\partial\Sigma v_i^2}{\partial\hat{b}}=0 \tag{0-4-3}$$

得出

$$\left.\begin{aligned}\Sigma y_i&=n\hat{a}+\hat{b}\Sigma x_i\\\Sigma x_iy_i&=\hat{a}\Sigma x_i+\hat{b}\Sigma x_i^2\end{aligned}\right\} \tag{0-4-4}$$

解此联立方程组,得

$$\left.\begin{aligned}\hat{a}&=\frac{\Sigma x_i^2\Sigma y_i-\Sigma x_i\Sigma x_i y_i}{n\Sigma x_i^2-(\Sigma x_i)^2}\\ \hat{b}&=\frac{n\Sigma x_i y_i-\Sigma x_i\Sigma y_i}{n\Sigma x_i^2-(\Sigma x_i)^2}\end{aligned}\right\}\qquad(0-4-5)$$

令

$$\left.\begin{aligned}s_{xx}&\equiv\Sigma(x_i-\bar{x})^2=\Sigma x_i^2-(\Sigma x_i)^2/n\\ s_{yy}&\equiv\Sigma(y_i-\bar{y})^2=\Sigma y_i^2-(\Sigma y_i)^2/n\\ s_{xy}&\equiv\Sigma(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})=\Sigma x_i y_i-\Sigma x_i\Sigma y_i/n\end{aligned}\right\}\qquad(0-4-6)$$

则由式(0－4－5)及(0－4－6)，又可得出

$$\left.\begin{aligned}\hat{b}&=s_{xy}/s_{xx}\\ \hat{a}&=\bar{y}-\hat{b}\bar{x}\end{aligned}\right\}\qquad(0-4-7)$$

为了反映变量 x、y 间的线性关系的密切程度，常用关联系数 r 来描述，其估算式为

$$\hat{r}=\frac{\Sigma(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{[\Sigma(x_i-\bar{x})^2\Sigma(y_i-\bar{y})^2]^{1/2}}=\frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}s_{yy}}}\qquad(0-4-8)$$

可以证明(见本节后的[附记]) $-1\leqslant r\leqslant+1$，当 $|r|\to1$ 时测量的数据点分布在一条直线附近，当 $r\to0$ 时数据点杂乱地分散开，另外 $\hat{r}$ 与 $\hat{b}$ 同符号(均由 s_{xy} 的符号决定正负).

从理论上讲，$r>0$ 就应承认 x、y 间存在一定的相关关系，但是由于 $\hat{r}$ 值是从较少的数据中求出的，根据数理统计理论，对于一定的 n 值，$\hat{r}$ 要在大于某一临界值 $r_{临}$ 时，才可以认为存在线性相关关系. 下表中给出了各 n 值对应的 $r_{临}$ 值.

n	3	4	5	6	7	8	9
$r_{临}$	0.999 8	0.990	0.959	0.917	0.874	0.834	0.798
n	10	11	12	13	14	15	16
$r_{临}$	0.765	0.735	0.708	0.684	0.661	0.641	0.623
n	17	18	19	20	21	22	
$r_{临}$	0.606	0.590	0.575	0.561	0.549	0.537	

可以证明①参量 $\hat{a}$、$\hat{b}$ 的标准偏差 s_a、s_b 和 y 的标准偏差 s_y 之间的关系为

$$\left.\begin{aligned} s_b &= s_y / \sqrt{s_{xx}} \\ s_a &= s_b \sqrt{\frac{\Sigma x_i^2}{n}} \end{aligned}\right\} \tag{0-4-9}$$

$$s_y = \left[\frac{\Sigma(y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i)^2}{n-2}\right]^{1/2} = \left[\frac{1-\hat{r}^2}{n-2} s_{yy}\right]^{1/2} \tag{0-4-10}$$

结合(0－4－9)、(0－4－10)二式,

$$s_b = \sqrt{\frac{1-\hat{r}^2}{n-2}} \cdot \frac{\hat{b}}{\hat{r}}$$

最小二乘法计算比较繁琐,一般用电子计算机或科学计算器进行.

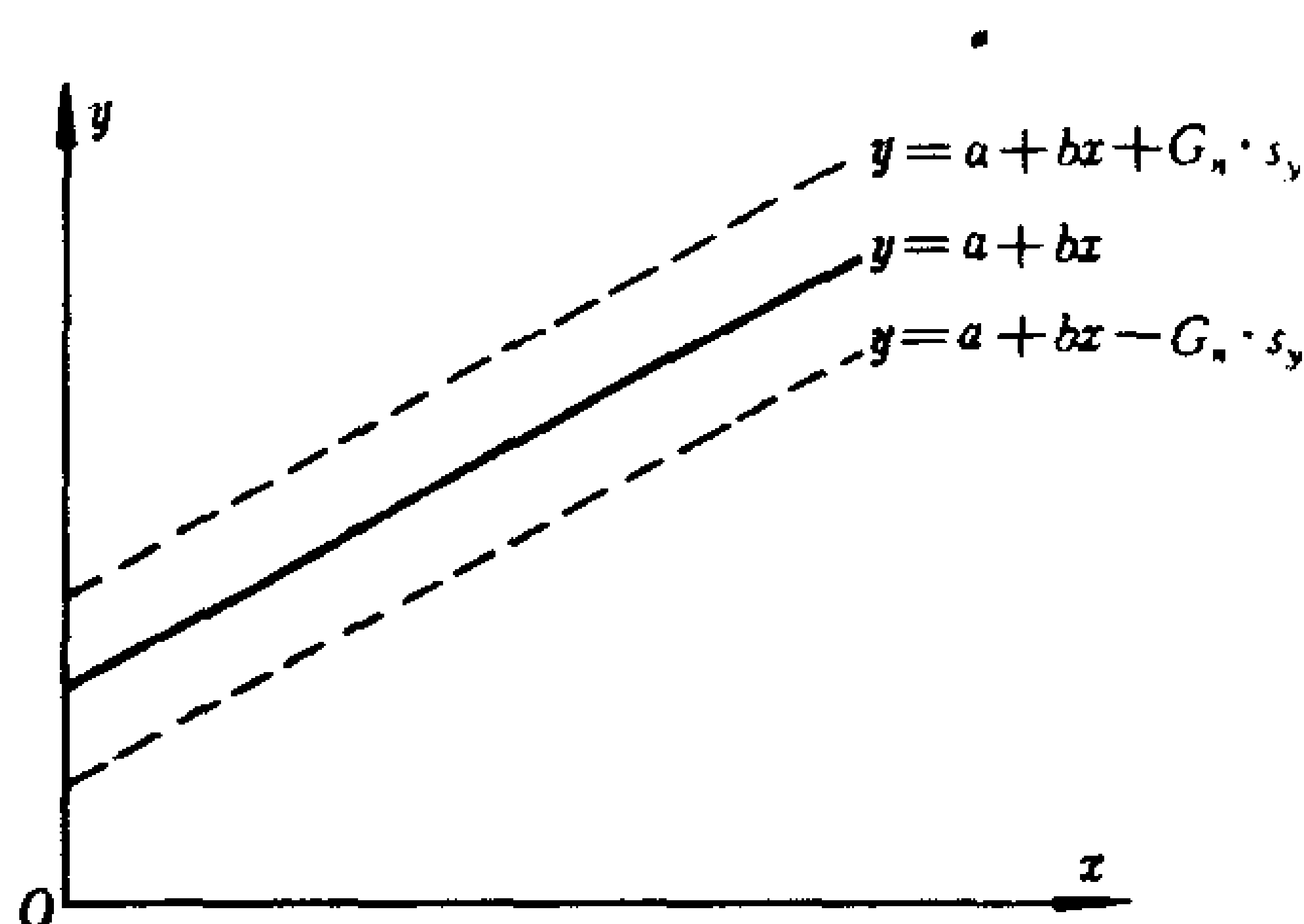


图 0－4－1

为了描述回归直线的精密度或"宽度",在回归直线 $y=\hat{a}+\hat{b}x$ 的两侧,取二平行直线

$$y' = \hat{a} + \hat{b}x - G_n \cdot s_y$$

$$y'' = \hat{a} + \hat{b}x + G_n \cdot s_y$$

式中的 G_n 为审查数据的格罗布斯判据系数.

① 参阅:肖明耀. 实验误差估计与数据处理. 北京:科学出版社,1980,151～153

例：已知变量 x 和 y 的测量值为

x	1.11	1.18	1.25	1.33	1.43	1.54	1.67	1.82	2.00
y	85.2	91.0	99.0	108	117	128	142	157	175
x	2.22	2.50	2.86	3.33	4.00	5.00	6.67	10.00	
y	198	226	262	312	377	480	654	990	

问：x、y 是否为线性关系？如果是，检查测量值中有否带有粗差的数据？求回归直线的截距 $\hat{a}$、斜率 $\hat{b}$ 及标准偏差 s_a、s_b.

解：用电子计算机算出

$$\hat{a} = -28.584\,600\,83,\quad s_a = 0.434\,097\,2$$

$$\hat{b} = 101.926\,231\,5,\quad s_b = 0.116\,406\,9$$

$$\hat{r} = 0.999\,990\,217\,7$$

$$s_y = 1.103\,594\,857$$

$n = 17$，查表 $r_{临} = 0.606$，而 $\hat{r} > r_{临}$ 可以认为 x、y 间是线性关系.

又按 $|y_i - (\hat{a} + \hat{b}x_i)|/s_y > G_n$ 与否审查数据点 (x_i, y_i) 偏离回归线是否过大. 在此 $n = 17$，查表知 $G_{17} = 2.47$. 审查结果第 16 组数据(6.67,654)的 $|y_i - (\hat{a} + bx_i)| = 2.48$ 偏大，剔除该数据后再计算，得

$$\hat{a} = -28.364\,741\,03,\quad s_a = 0.315\,865\,8$$

$$\hat{b} = 101.781\,587\,8,\quad s_b = 0.091\,201\,46$$

$$\hat{r} = 0.999\,994\,379\,7$$

$$s_y = 0.790\,167\,403\,9$$

再审查数据均可保留，结果

$$\hat{a} = -28.4,\quad s_a = 0.3$$

$$\hat{b} = 101.78,\quad s_b = 0.09$$

$$\hat{r} = 0.999\,994$$

回归方程为

$$y = -28.4 + 101.78x$$

［附记］

关于 $r \geqslant -1$、$r \leqslant +1$ 的证明

已知 $r=\Sigma(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})/[\Sigma(x_i-\bar{x})^2\Sigma(y_i-y)^2]^{1/2}$，现在假设全部数据点$(x_i,y_i)$刚好在直线上，即 $y_i=a+bx_i$ 完全成立，将 r 计算式中的 y 换以$(a+bx)$，则为

$$r=\frac{\Sigma(x_i-\bar{x})(a+bx_i-a-b\bar{x})}{[\Sigma(x_i-\bar{x})^2\Sigma(a+bx-a-b\bar{x})^2]^{1/2}}$$

$$=\frac{b\Sigma(x_i-\bar{x})^2}{[b^2\Sigma(x_i-\bar{x})^2\Sigma(x_i-\bar{x})^2]^{1/2}}=\pm 1$$

上式中分子式中的 b 可能大于零或小于零，而分母式求出的 b 大于零，因此相关系数 $r=+1$ 或 $r=-1$.

当数据点如图 0－4－2 散开时，取$(\bar{x},\bar{y})$为原点$(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})$之值，在 1、3 象限为正，在 2、4 象限为负，因此当 $n\to\infty$时，对杂乱散开的数据点 $\Sigma(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\to 0$，即 $r\to 0$，在一般情况下则 $-1<r<+1$，而且$|r|\to 1$ 其相关性较好，误差较小.

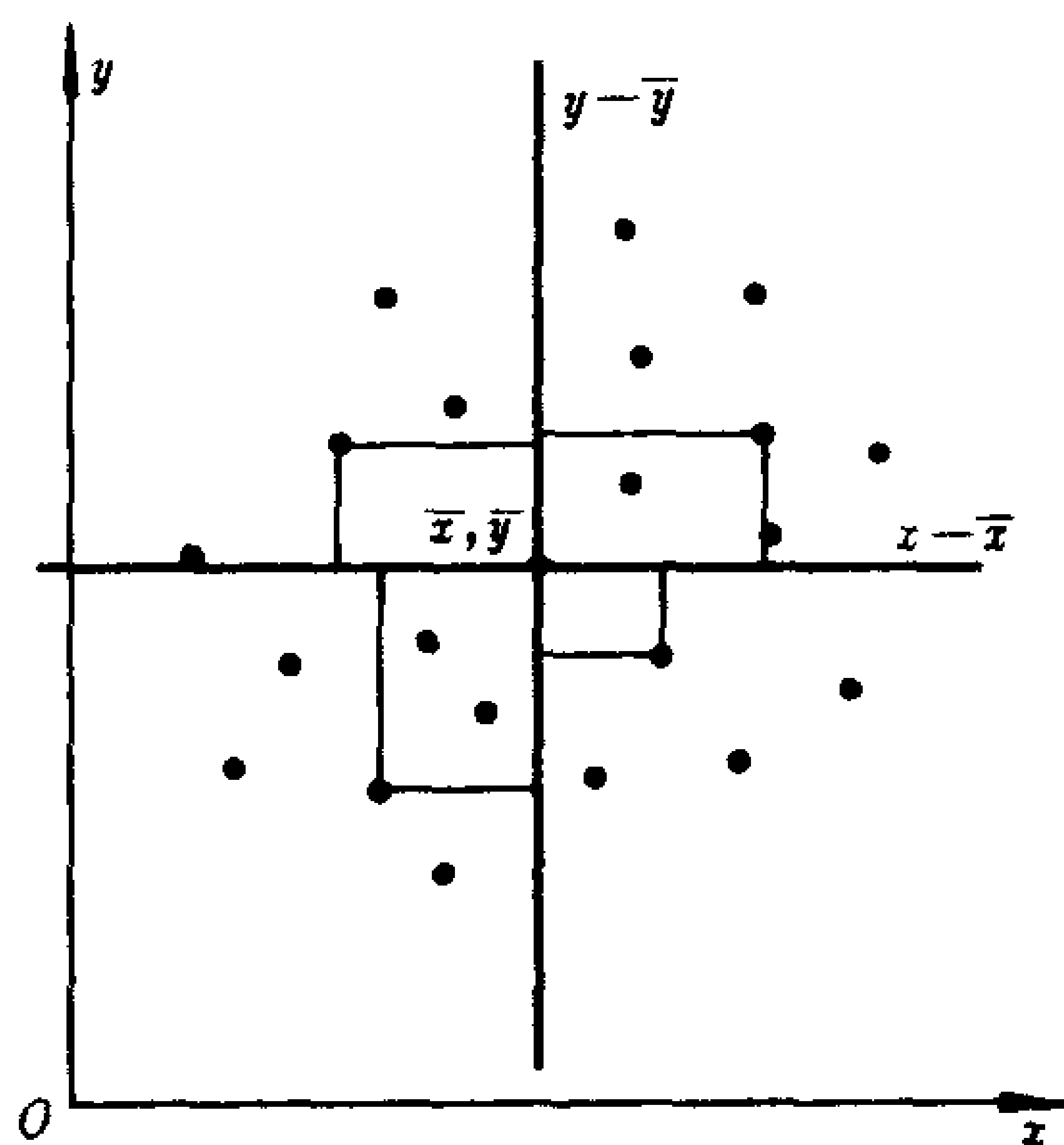


图 0－4－2

例如，$\frac{s_b}{b}=0.01$，$n=10$ 时，$r=0.999\ 6$

$\frac{s_b}{b}=0.001, n=10$ 时, $r=0.999\ 996$

§5 电磁学实验基础知识

§5-1 电 表

电表的种类很多,有磁电型、电磁型、电动型、静电型,等等.其中以磁电型电表应用最为广泛,它在仪表中占有极重要的地位.

磁电型仪表的基本结构如图 0-5-1 所示.

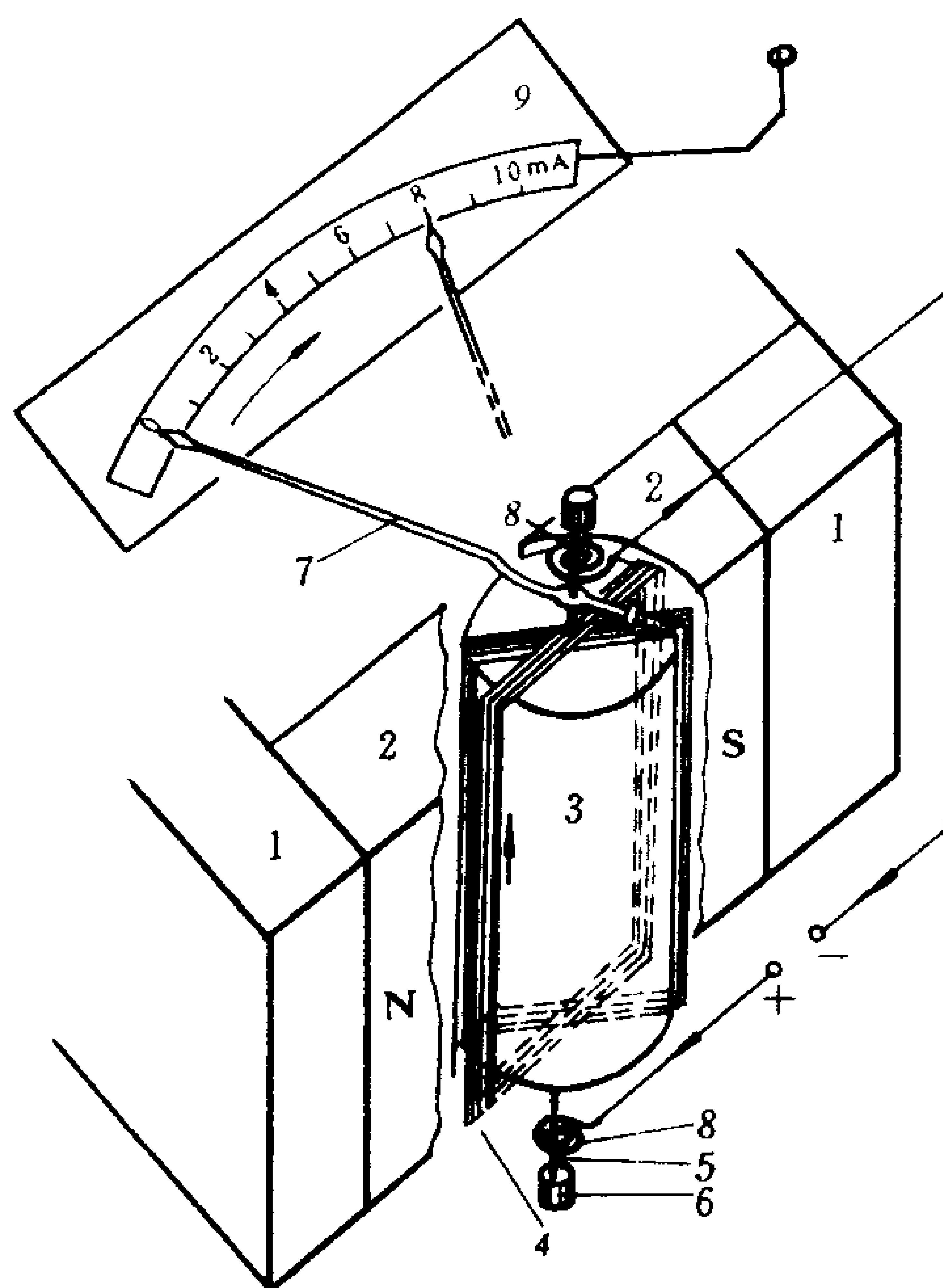


图 0-5-1 磁电型仪表基本结构图

1.永久磁铁; 2.极掌; 3.圆柱形软铁芯; 4.动圈; 5.半轴; 6.轴承; 7.指针; 8.游丝; 9.刻度盘

仪表的测量机构包含有固定的部分和活动的部分．磁电型仪表的磁路系统是固定的，它由永久磁铁1，在其两个极上连接两个带有圆柱形孔腔的“极掌”2，和孔腔中央固定着的小圆柱形软铁心3构成．这种结构使磁感应线集中于孔腔之中并呈均匀的辐射状，如图0－5－2所示．活动部分则包括活动(通电)线圈和指示器(如指针和转轴等)．

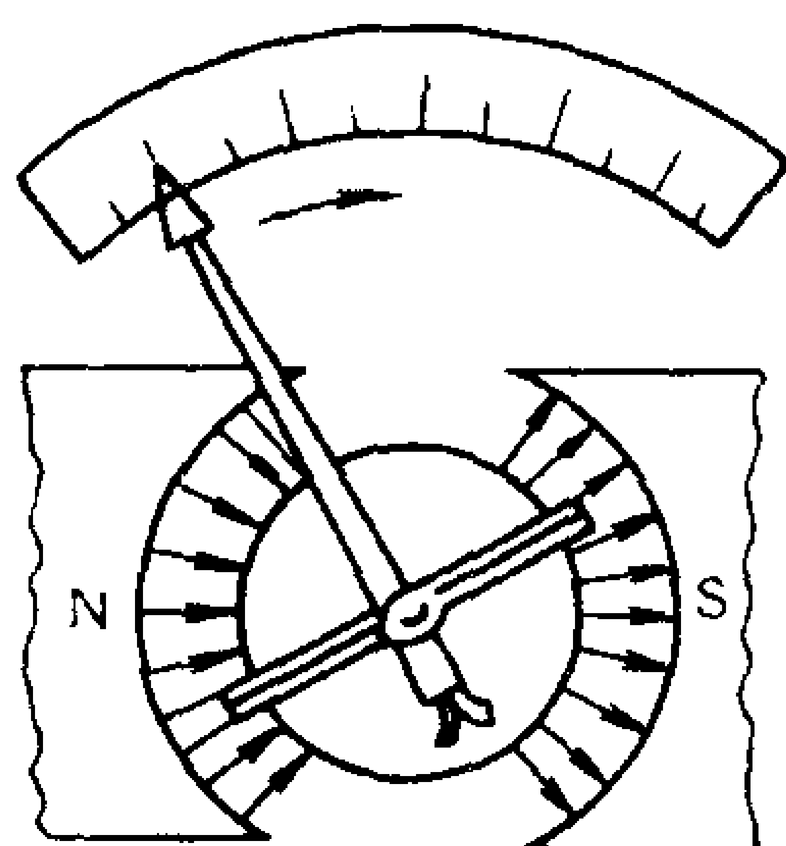


图0－5－2　磁电型测量机构气隙中的磁场

通电线圈4匀称地放置在磁场中，并可绕软铁心轴线自由地转动，在垂直于圆柱轴线的二个线圈边的中点各连接一个半轴5，借以把线圈4支撑在轴承里，轴上装有指针7，线圈偏角的大小由指针在刻度盘上的方位示出．

当线圈通以恒定电流 I 后，它将在磁场 B 中受到一力矩，从图0－5－2可以清楚地看到，由于线圈所在的磁场呈均匀辐射状(沿半径方向)，故线圈不论转到任何方位其所受力矩 M_I 的大小均由下式决定：

$$M_I = Fa = 2(BNIab) = BNSI \qquad (0-5-1)$$

式中，a 是线圈宽度的一半，b 为线圈边长，N 为线圈匝数，S 是线圈的面积．线圈在此力矩作用下发生偏转，假如只有转动力矩的作用则不论电流大小如何，指针会一直偏转下去，直偏到标度盘边缘受阻后才会停止．为了使偏转大小和被测电流的大小相对应，就必需有一反作用力矩与转矩相平衡，为此在线圈的两半轴上各连一螺旋形游丝8，它一方面产生反抗力矩，同时又兼作把电流引入线圈的引线．因此当线圈通以电流时，它不仅受到电磁力矩 M_I，而且同时又受到游丝的反作用力矩 M_D 的作用．

$$M_D = -D\alpha \qquad (0-5-2)$$

式中 D 是弹性系数，负号表示力矩和转动方向相反．当线圈转到

一定角度时，二力矩相平衡

$$M_I + M_D = 0$$

$$BNSI = D\alpha$$

$$\alpha = \frac{BNS}{D} I = S_I I \tag{0-5-3}$$

式中的 $S_I = \dfrac{BNS}{D}$ 是磁电型测量机构的灵敏度，当电表制定后 B、S、N、D 均为定值，则 S_I 为常量.

由(0－5－3)式可以看出，磁电型仪表可用来测量电流以及与电流有关的物理量(即经过变换可以转化为电流的量)，因为它的偏转角 α 与通过线圈的电流 I 成正比，所以标度尺上的刻度是均匀的.

在指针仪表里为了使仪表起始位置在零位，还设有一个“调零器”，如图 0－5－3 所示. 调零器 5 的一端与游丝 3 相连，如果仪表起始时不在零位，可用小起子轻轻调节露在表壳外面的“调零器”的螺杆 6，使指针处在零刻度位置.

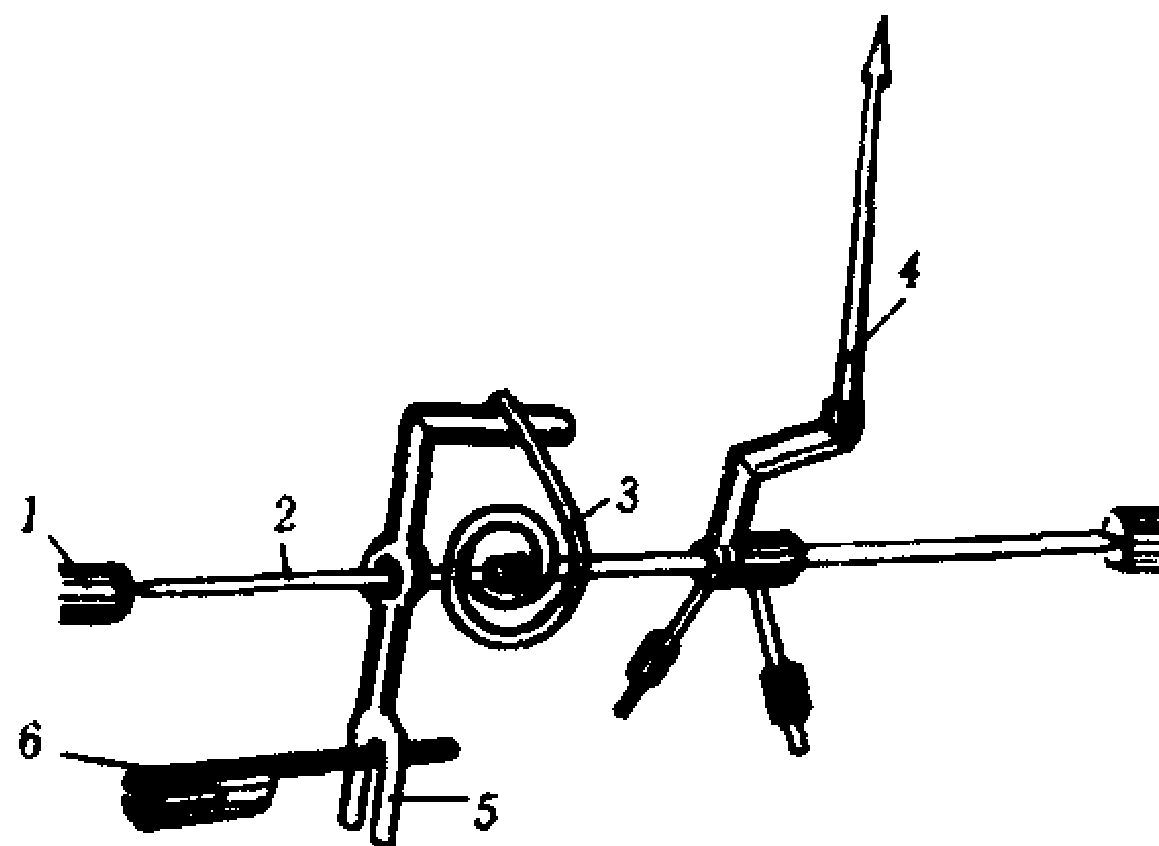


图 0－5－3　调零器结构图

1. 宝石轴承；2. 轴；3. 游丝；4. 指针；5. 调零器；6. “调零器”螺杆

磁电型测量机构(亦称表头)所能通过的电流往往是很微小的. 因为线圈的导线很细，磁电型测量机构用作电流表时，只要被测电流不超过它所能容许的电流值，就可将它与负载相串联进行

测量. 测量的电流范围一般在几十微安到几十毫安之间,如果要测较大的电流,必须扩大量程.

1. 直流电流表

直流电流表串联在电路中,用以测量直流电路中电流的大小. 磁电型电流表采用分流的方法来实现扩大量限的,图 0－5－4 中的 R_s 即为在表头两端并联的一个分流电阻,分流电阻越小,电流表的量程越大.

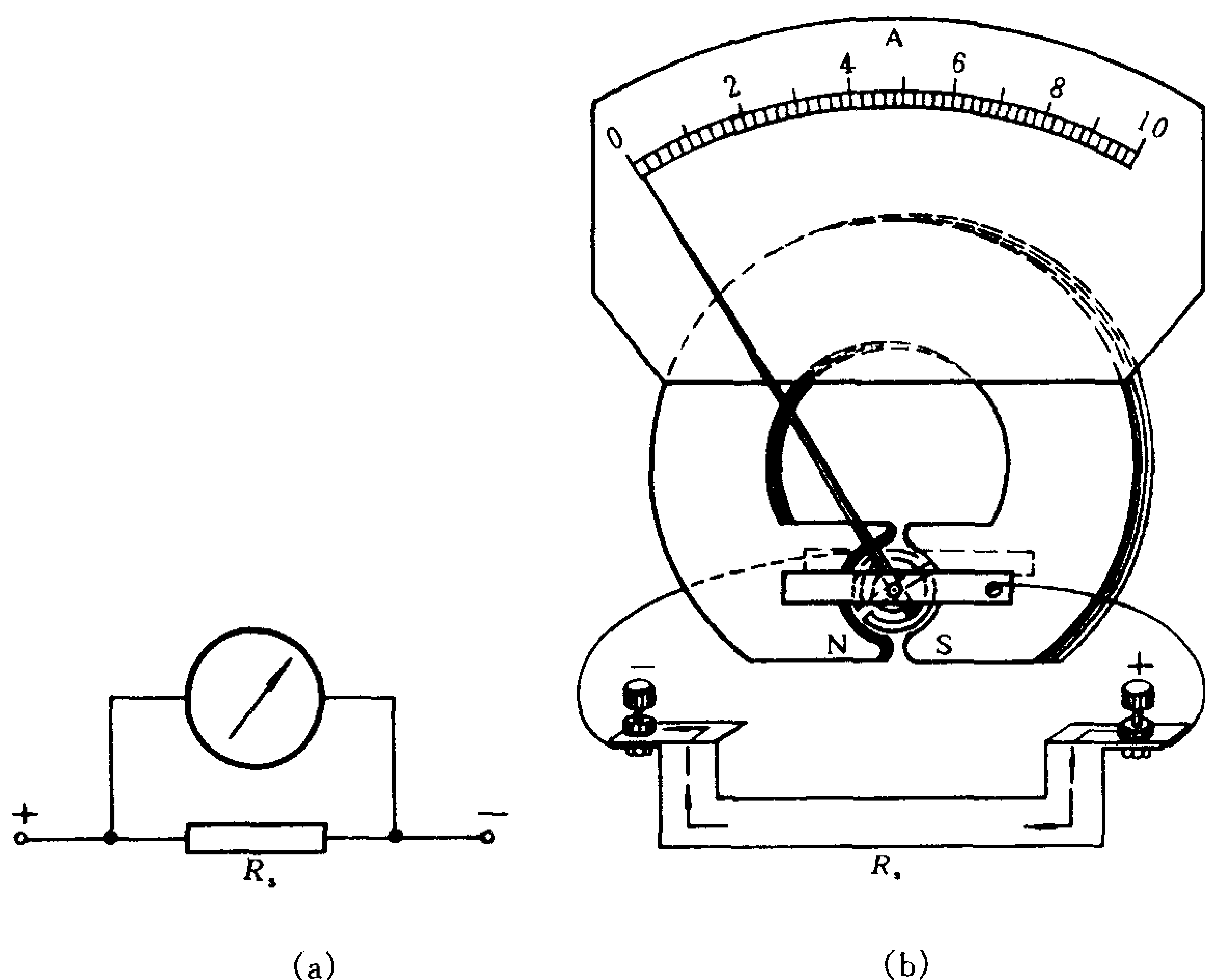


图 0－5－4 (a)安培表电路图;(b)安培表结构示意图

主要规格:

量程——指测量的上限值与下限值的差值,一般与测量范围无区别,如 0～100 mA,0～5 A,－50～＋50 μA. 有多量程的电流表.

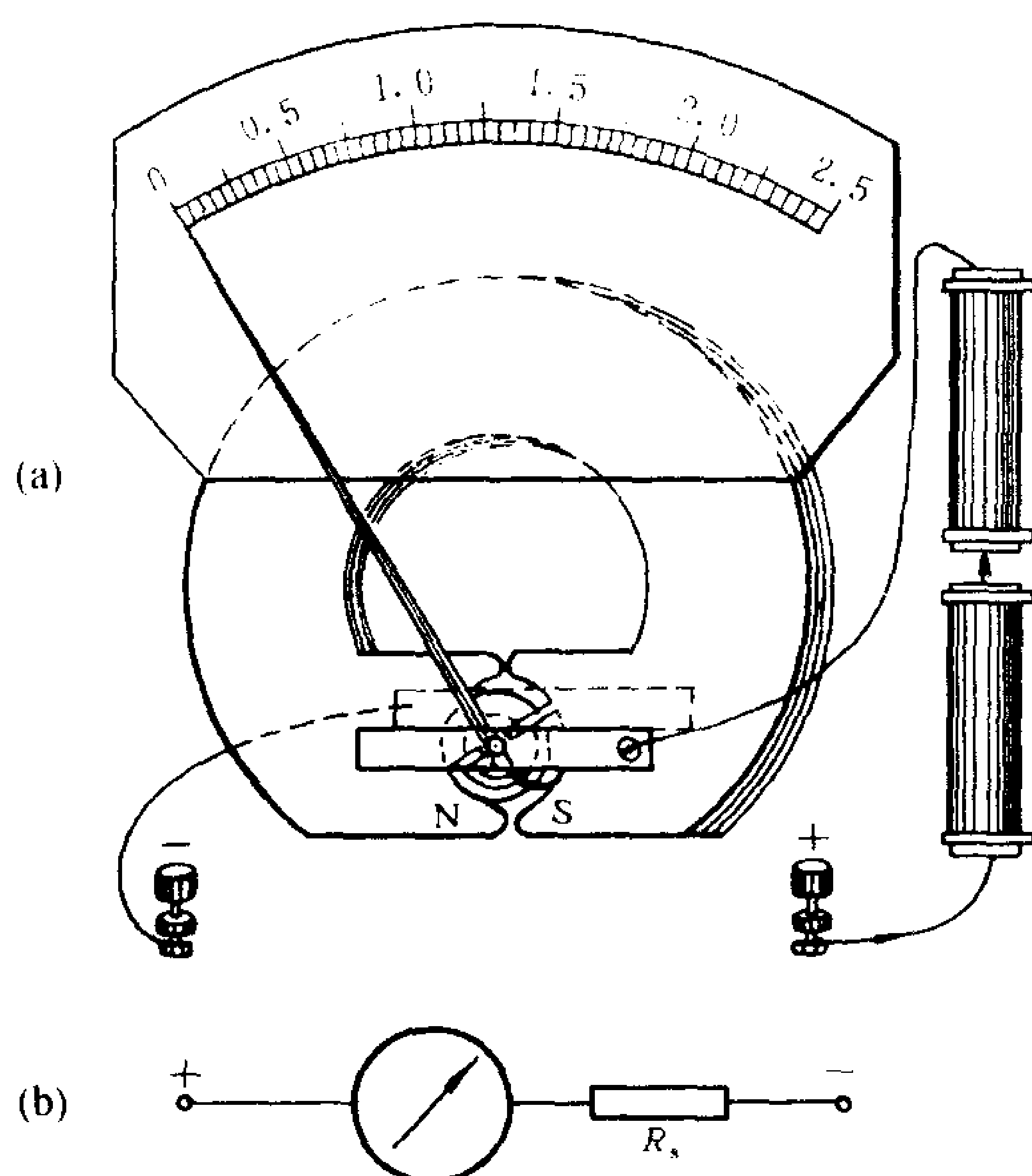
内阻——内阻越小量程越大,一般安培计内阻在 0.1 Ω 以下,

毫安表一般为几欧姆至一二百欧姆，微安表一般为几百欧姆至一二千欧姆.

2. 直流电压表

直流电压表由小量程直流电流表串联一电阻构成，串联不同的电阻构成不同量程的电压表，如图 0－5－5 所示，它与电路两端并联，测量电路两端电压的大小.

(a)



(b)

+ 　 R_s 　 −

图 0－5－5　(a)伏特表结构示意图；(b)伏特表电路图

主要规格：

量程——指针满度时的电压值. 有多量程的电压表，如 0～1.5～3.0～7.5 V 的电压表.

内阻——电压表的内阻越大，对被测对象的影响越小. 电压表各量限的内阻与相应电压量程之比为一常量，这常量常在电压表标度盘上标明，它的单位为 Ω/V，它是电压表的重要参量.

所以　　内阻＝量程×每伏欧姆数

例如：量程为 100 V 的电压表，其每伏欧姆数为 10 000 Ω/V，则内阻为 1 000 kΩ.

使用电表应注意以下几点：

(1) 量程的选择：应先估计被测量的大小，选择合适的量程，可先用大量程测试一下，再选更合适的量程.

(2) 电表有二个端钮，直流电表均有标明"+"、"-"的两个端钮，"+"表示电流流入端，"-"表示电流的流出端，不能接反，否则电表指针反向偏转.

(3) 电压表与电路中被测负载的两端相并联，电流表与电路相串联.

(4) 读数时视线必须垂直于刻度盘，若电表附有镜子，则必须在指针与镜中的象重合时读数，这样可减少由于视差引入的误差.

3. 仪表的误差和电表的级别

用任何仪表测量都会有误差，即仪表的指示值和实际值之间有一定差异. 根据误差产生的原因可分为以下二种：

(1) 固有误差(亦称基本误差)

它是指仪表在规定的条件下进行测量时所具有的误差，它是仪表本身所固有的，是由于结构上不完善而产生的，例如线圈在转动时轴承里的摩擦和刻度划分不精确等等原因引起的误差均属固有误差.

仪表正常工作条件主要是指：

① 仪表指针应调整于零位；

② 仪表应按要求置于水平、垂直或倾斜位置；

③ 环境温度为 +25 ± 5 ℃，或仪表上标明的温度值；

④ 应避免外界电磁场的干扰和机械震动、冲击；

⑤ 仪表负载，输入输出功率、电压、频率应符合技术规定条件.

(2) 附加误差

仪器的附加误差是由于偏离正常条件或在某一影响因素作用

下而产生的误差，这个数值变化是相对于正常条件时的示值而言的，不是相对于真值而言的，附加误差是一个因素引起的示值变化，而不是二个或二个以上因素引起变化的总和，因此在附加误差前常冠以产生附加误差因素的名称，如温度附加误差等.

仪表误差的几种表示法

（1）绝对误差

仪表的示值 x_i 和被测量实际值 x_0 之间的差值为绝对误差.

$$\Delta_i = x_i - x_0 \qquad (0-5-4)$$

（2）相对误差

它是绝对误差 Δ_i 与被测量的实际值 x_0 之间的比值，通常是以百分数 E 表示，即

$$E = \frac{\Delta_i}{x_0} \times 100\% \qquad (0-5-5)$$

（3）引用误差

仪表的绝对误差在度盘上各点处差别不大，而相对误差则由于测量值可能有较大变化而差异很大，所以相对误差不便于表达仪表的准确程度.

引用误差是绝对误差 Δ_i 与仪表的上限值 X_{max} 的比值，用 E_n 表示引用误差，即

$$E_n = \frac{\Delta_i}{X_{max}} \times 100\% \qquad (0-5-6)$$

由于仪表上各点的绝对误差稍有不同，因而各点的引用误差也有些差异，但是其差异较小，所以**用最大引用误差表示电表的准确度**：

$$E_{max} = \frac{\Delta_{max}}{X_{max}} \times 100\%$$

（4）电表的准确度与级别的表示

按国家标准，电表的准确度分为 7 个等级，有

0.1　0.2　0.5　1.0　1.5　2.5　5.0

各等级和电表的最大引用误差(Δ_{max}/X_{max})×100%的关系是:设电表的等级为 a,则

$$a\% \geq \frac{\Delta_{max}}{X_{max}} \times 100\% \qquad (0-5-7)$$

即仪表准确度等级的百分数表示合格的该等级的仪表,在规定条件下使用时所允许的最大的引用误差.

例如,有一0.5级量限为0~1 A的电流表,按上式其 $\Delta_{max} \leq 5$ mA.这表示生产厂家生产此种规格的电表,其基本误差必须在±5 mA以内.我们在实验室使用此规格的电表时,可以认为它的最大绝对误差不超过5 mA.

(5) 电表量程的选择

电表的准确度等级越小表示基本误差越小,即电表的准确度越高.在极限情况下,电表可能的最大绝对误差 Δ_{max} 为

$$\Delta_{max} = X_{max} \times a\%$$

在电表示值为 x_i 时,可能出现的最大相对误差 E_m 为

$$E_m = \frac{\Delta_{max}}{x_i} \times 100\% = \frac{X_{max} \times a\%}{x_i} \times 100\%$$

这表示测量值的相对误差不仅和电表的准确度等级、测量值的大小有关,还和电表的量程有关,测量值越接近电表上限值相对误差越小.

一般是使 $x_i \geq \frac{2}{3} X_{max}$ 去选取量程.

(6) 仪表读数的有效位数

若已知电表的级别 a 与量程 X_{max},则电表的最大绝对误差可由下式求得:

$$\Delta_{max} = X_{max} \times a\%$$

它表示该表一次测量的可靠程度.测量结果的有效位数由最大的绝对误差决定.

例如,量程100 mA的1.0级电流表共分100个小格,仪表示值为80.0,应如何记数?

由电表的级别与量程先求出最大绝对误差

$$\Delta_{max} = 100 \times 1\% = 1 \text{ mA}$$

故测量结果应表示为(80 ± 1) mA

测量的相对误差

$$E = \frac{\Delta_{max}}{x_i} \times 100\% = \frac{1}{80} \times 100\% = 1.2\%$$

对于那些需要作进一步运算的读数,可在最小分度间再估读一位,估读值根据仪器的分辨率和实验者的判别能力来确定.一般可估读到最小分度的1/10～1/2.

(7) 数字电表的读数与误差表示法

数字电表具有准确度高、灵敏度高、测量速度快等优点.

数字电表读数的有效位数:数字式仪表的显示值均为有效位数.

数字电压表的允许基本误差 Δ 表示为

$$\Delta = \pm(a\% U_x + b\% U_m) \quad (0-5-8)$$

式中,U_x 为测量指示值,U_m 为测量上限值,a 为与示值有关系数,b 为与满度值有关系数.

例: PZ95 $4\frac{1}{2}$ 直流数字电压表200 mV档,准确度等级为0.05,允许基本误差 $\Delta = \pm(0.04\% U_x + 0.01\% U_m)$.

[附记]

表0-5-1 常用电气测量指示仪表和附件的符号

A. 测量单位及功率因数的符号			
名 称	符 号	名 称	符 号
千安	kA	伏特	V
安培	A	毫伏	mV
毫安	mA	微伏	μV
微安	μA	兆瓦	MW
千伏	kV	千瓦	kW

续表

A. 测量单位及功率因数的符号			
名　称	符　号	名　称	符　号
瓦特	W	相位角	φ
兆乏	Mvar	功率因数	$\cos\varphi$
千乏	kvar	无功功率因数	$\sin\varphi$
乏	var	库仑	C
兆赫	MHz	毫韦伯	mWb
千赫	kHz	毫特斯拉	mT
赫兹	Hz	微法	μF
太欧	TΩ	皮法	pF
兆欧	MΩ	亨利	H
千欧	kΩ	毫亨	mH
欧姆	Ω	微亨	μH
毫欧	mΩ	摄氏度	℃
微欧	μΩ		

B. 仪表工作原理的图形符号			
名　称	符　号	名　称	符　号
磁电系仪表		铁磁电动系仪表	
磁电系比率表		铁磁电动系比率表	
电磁系仪表		感应系仪表	
电磁系比率表		静电系仪表	
电动系仪表		整流系仪表（带半导体整流器和磁电系测量机构）	
电动系比率表		热电系仪表（带接触式热变换器和磁电系测量机构）	

C. 电流种类的符号	
名　　称	符　　号
直流	—
交流(单相)	~
直流和交流	≂
具有单元件的三相平衡负载交流	≋

D. 准确度等级的符号	
名　　称	符　　号
以标度尺量限百分数表示的准确度等级,例如1.5级	1.5
以标度尺长度百分数表示的准确度等级,例如1.5级	\/1.5
以指示值的百分数表示的准确度等级,例如1.5级	(1.5)

E. 工作位置的符号	
名　　称	符　　号
标度尺位置为垂直的	⊥
标度尺位置为水平的	⊓
标度尺位置与水平面倾斜成一角度例如60°	∠60°

F. 绝缘强度的符号	
名　　称	符　　号
不进行绝缘强度试验	☆0
绝缘强度试验电压为2 kV	☆2

G. 端钮、调零器的符号	
名　　称	符　　号
负端钮	—
正端钮	+
公共端钮(多量限仪表和复用电表)	✳
接地用的端钮(螺钉或螺杆)	⏚
与外壳相连接的端钮	⊥
与屏蔽相连接的端钮	◌
调零器	⌒

H. 按外界条件分组的符号	
名　　称	符　　号
Ⅰ级防外磁场(例如磁电系)	[∩]

续表

H. 按外界条件分组的符号			
名　称	符　号	名　称	符　号
Ⅰ级防外磁场(例如静电系)	[illegible]	Ⅲ级防外磁场及电场	Ⅲ Ⅲ
Ⅱ级防外磁场及电场	Ⅱ Ⅱ	Ⅳ级防外磁场及电场	Ⅳ Ⅳ

§5-2 万用电表

万用电表是实验室常用的一种仪表，可用来测量电压、电流、电阻、交流电压及电流等，还可用以检查电路和排除电路故障.

万用电表主要由磁电型测量机构(亦称表头)和转换开关控制的测量电路组成. 实际上它是根据改装电表的原理，将一个表头分别连接各种测量电路而改成多量程的电流表、电压表及欧姆表，是既能测量直流还能测量交流的复合表，如图 0-5-6 所示. 它们合用一个表头，表盘上有相应于测量各种量的几条标度尺. 表头用以指示被测量的数值，测量线路的作用是将各种被测量转换到适合表头测量的直流微小电流，转换开关实现对不同测量线路的选择，以适应各种测量的要求. 电表的表盘上按表的功能有各种不同的刻度，以指示相应的值，如：电流值，电压值(有交、直流之分)及电阻值等. 对于某一测量的内容一般分成大小不同的几档，测量电阻时每档标明不同的倍率. 每档标明的是它相应的量限，即使用该档测量时所允许的最大值，而各种量、各种不同的量限所对应的测量电路均通过转换开关实现和表头的连接. 所以测量时可通过转换开关实现对不同测量线路的选择，以适应各种测量的要求.

直流电流、电压表前面已讨论过，下面将介绍欧姆表的简单原理.

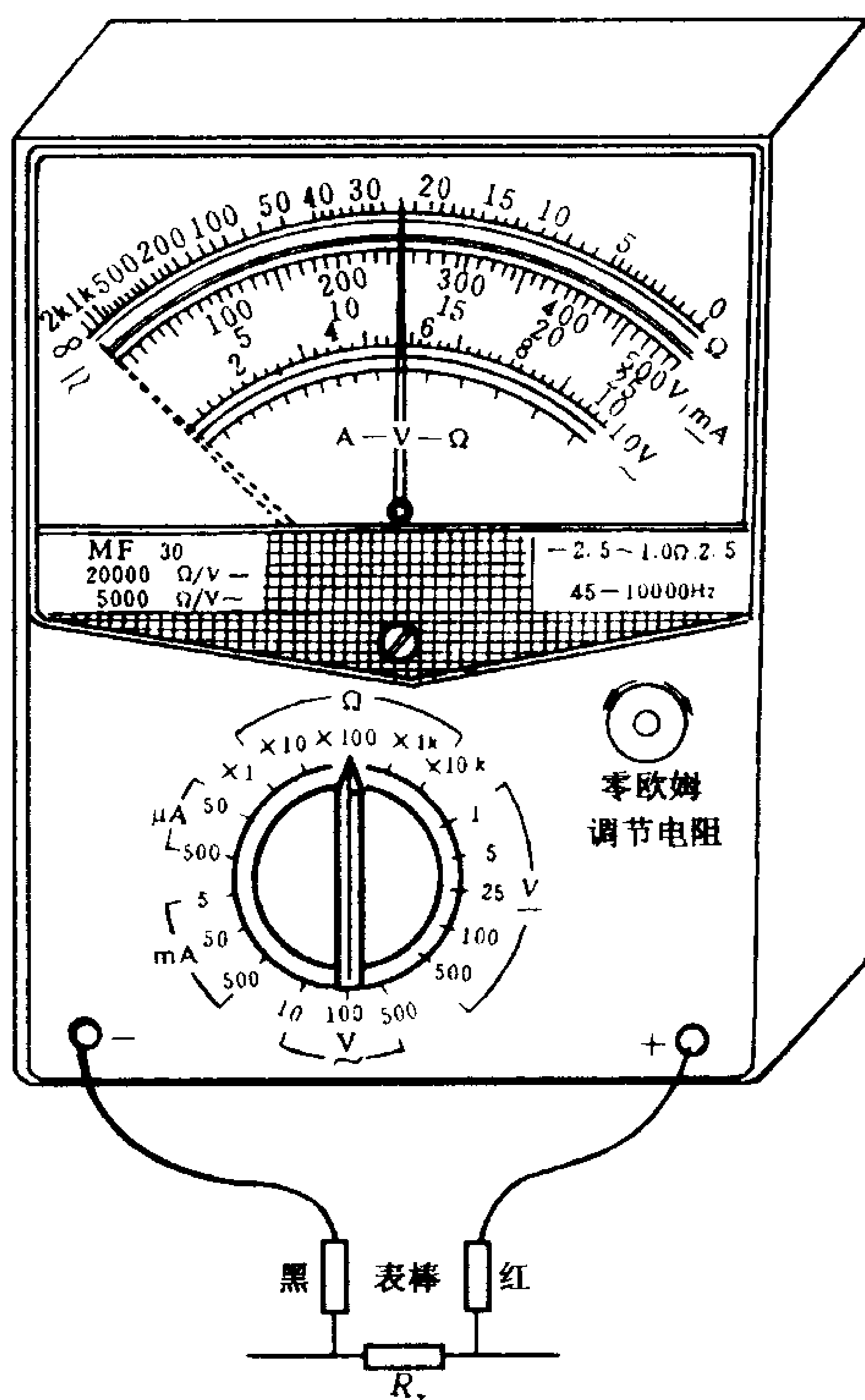


图 0－5－6　MF－30 型万用电表外形图

欧姆表测量电阻的简单原理如图 0－5－7 所示.

表头、干电池 E、可变电阻 R_0 及待测电阻 R_x 串联构成回路,电流 I 通过表头即可使表头指针偏转,其值为

$$I=\frac{E}{R_g+R_0+R_x} \tag{0-5-9}$$

由上式可知当电池电压一定的条件下,指针偏转和回路的总电阻成反比,当被测电阻 R_x 改变时,电流就变化,表头的指针位置也有相应的变化,可见表头的指针位置与被测电阻的大小是一一对

应的，如果表头的标度尺按电阻刻度，这样就可以直接用来测量电阻了. 被测电阻 R_x 越大，回路电流越小，指针的偏转越小，当 R_x 为无穷大时（即表棒 a、b 两端开路），则 $I=0$，表头指针为零，因此欧姆表的标尺刻度与电流表、电压表的标尺刻度方向相反. 由于工作电流 I 与被测电阻 R_x 不成正比关系，所以电阻的标度尺的分度是不均匀的，如图 0－5－6 所示.

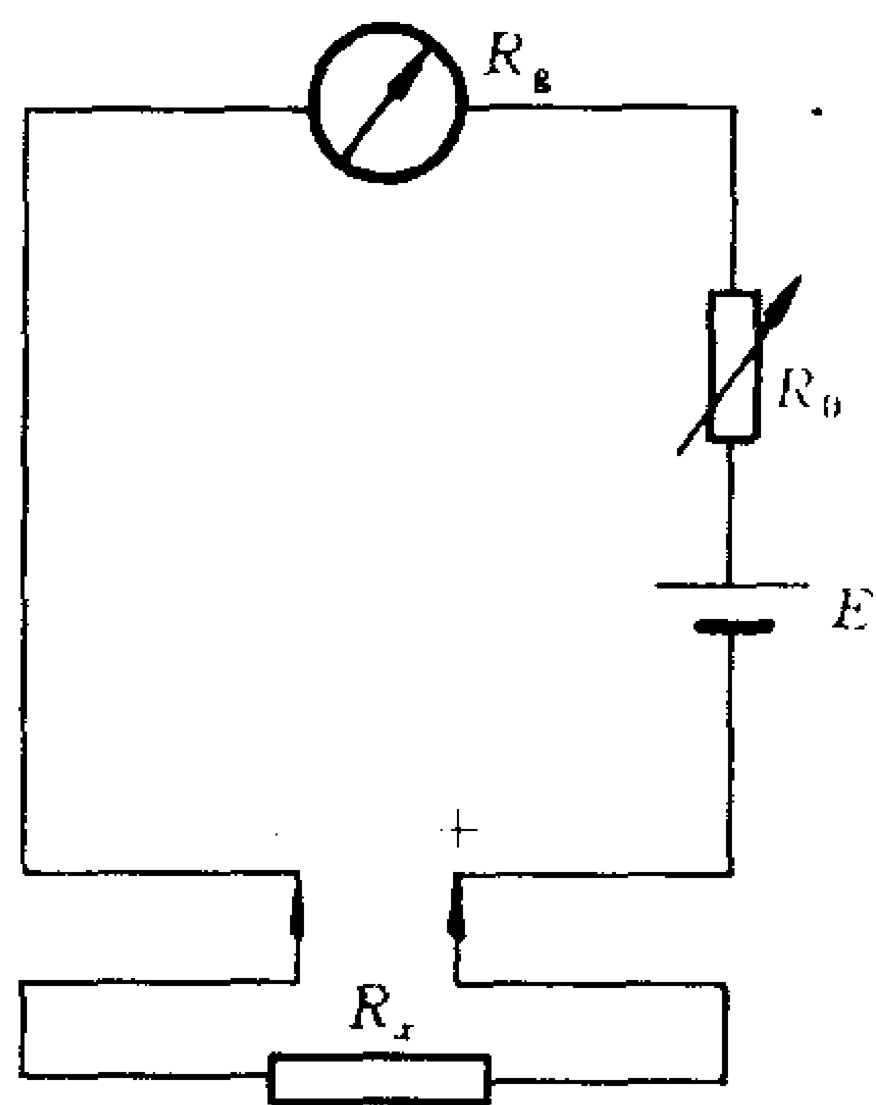


图 0－5－7　欧姆表基本原理图

由于电池的电动势会渐渐下降，这样就造成较大的测量误差，故这种结构形式的欧姆表都设有“零欧姆”调整电路，使用时必须将表棒二端短路（即 $R_x=0$），调节“零欧姆”旋钮，使指针指向满度，即指针指向 0 Ω 处. 每当改变欧姆表的量程后，都必须重新调节“零欧姆”旋钮.

使用万用电表时应注意以下几点：

1. 首先要搞清需测什么物理量. 切勿用电流档、欧姆档测量电压.

2. 正确选择量程. 如果被测量的大小无法估计，应选择量程最大的一档，以防仪表过载，若偏转过小，则将量程变小，直至选择偏转角尽量大而未超格的量程.

3. 测量电路中的电阻时，应将被测电路的电源切断.

4. 用万用电表测量电阻时，应在测量前先校正电阻档的零点，在换量程后也需重新调零，否则读数不准确.

5. 万用电表用毕，应将旋钮调到交流电压最大一档或调到空档（有的万用表旋钮调至空档“·”处），以免下次使用时不慎损坏电表，特别注意不要停在欧姆各档. 以免表棒两端短路，致使电池长时间通电.

用万用电表检查电路故障：

检查电路的故障，就是找出故障的原因，首先应检查电路设计图有否错误，其次检查电路是否有接错、漏接和多接的情况，有时电路接线正确，但电路还存在故障，如电表或元件损坏而导致断路或短路，又如导线断路或焊接点假焊、电键的接触不良均会造成断路，这些故障往往无法从外观发现，排除这种故障往往要借助于仪器进行检查，通常是用万用电表.

(1) 电压检查法

在通电的情况下，常采用逐点测试电压的方法找寻故障的所在，如图 0－5－8 的分压电路，当接通电路时电压表、电流表均无指示.

一般可用万用电表的电压档进行测量检查(注意万用电表的电压量程应大于或等于电源电压)，先检查电源电压是否正常，然后观测 AB 两端有否电压，若电压正常则移动滑动头 C，观察分压电压 DE 两端有否变化，若无变化再量 CB 间的电压，若正常则故障一定在 CD 之间，可能 CD 间导线内部断开，或是 C、D 端接触不良，若 CD 之间另换完好的导线后，电压表指示正常，但安培表仍无指示，则故障一定在 DFH 的支路里，该支路导线至少有一处断线或接触不良，或安培表已损坏，负载本身断路. 只要有其中一个原因均会引起安培表无指示，故从电压的异常情况就可找到故障的所在.

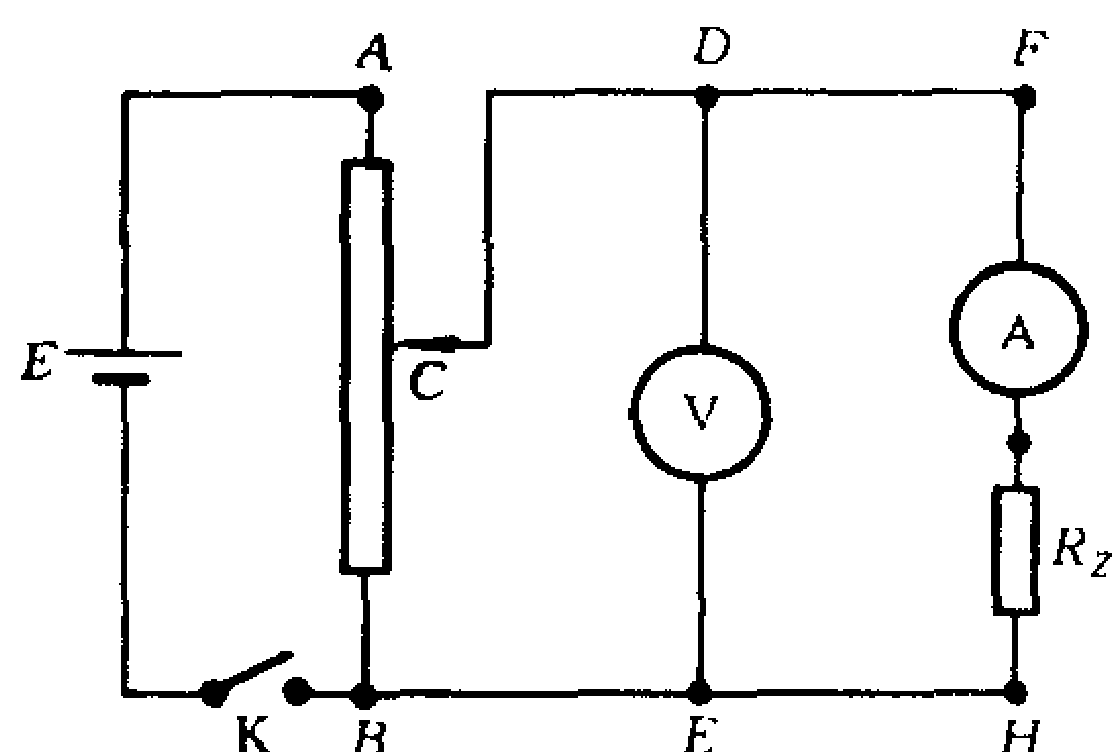


图 0－5－8　分压电路图

这种方法的优点是在有源的电路中能带电测量，检查运行状态下的电路，简便见效又快.

(2) 电阻检查法

它要求在切断电源后不带电的情况下检查，并且待测部分无其他分路，对电路各个元件、导线逐个进行检查测量. 这种方法对

检查各个元件、导线等的质量好坏，查明故障的所在及原因是十分有用的.

§5-3 电 阻 器

1. 滑线变阻器

在电磁测量中经常借助于滑线变阻器来调节电路的电压与电流，它的结构如图 0-5-9(a)所示.

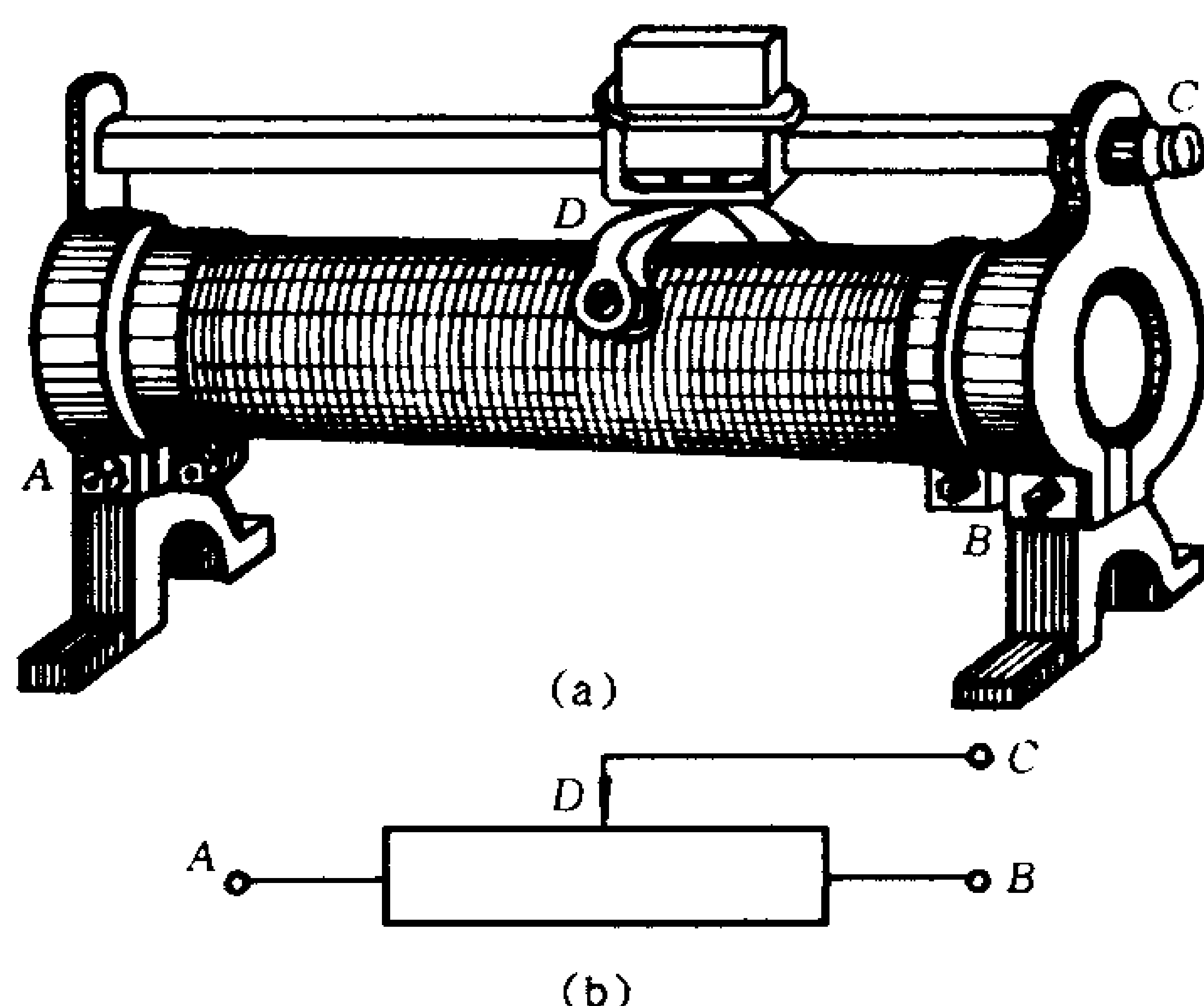


图 0-5-9 滑线变阻器

它由电阻丝均匀绕在绝缘瓷管上制成，电阻丝的表面涂有一层绝缘膜，使丝间彼此绝缘，电阻丝的两头分别固结在瓷管两端的 A、B 接线柱上，滑动头 D 可沿金属杆滑动，杆的两端支撑在金属架上，并与其绝缘，杆的一端连有接线柱 C；滑动头和电阻丝相接触处的绝缘膜已被刮掉，因此改变滑动头的位置就可以改变 AC（或 BC）之间电阻的大小，变阻器的符号如图 0-5-9(b)所示.
变阻器的规格有：

额定电流：允许通过变阻器的最大电流.

全电阻：A、B 间电阻丝的电阻值.

以上数据均在铭牌上标明.

小型的变阻器又称电位器，它在电子线路等电路中有着广泛的应用，其规格型号有许多种．电位器如图 0－5－10 所示，其中 A、B、C 头与滑线变阻器 A、B、C 点相对应．功率从零点几瓦至数瓦．使用时勿超过它的额定功率，否则容易烧毁．

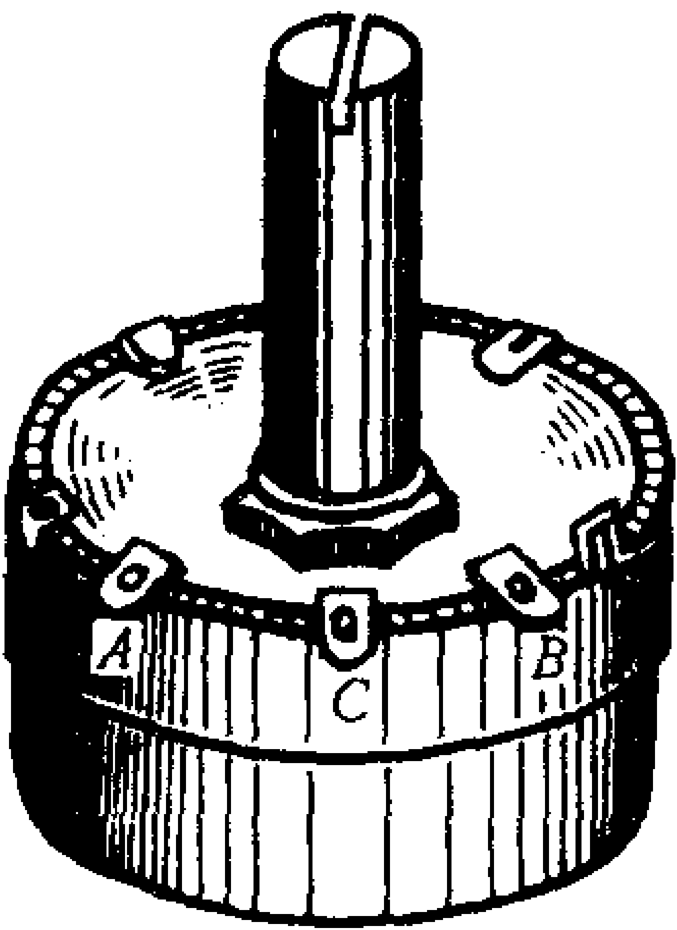
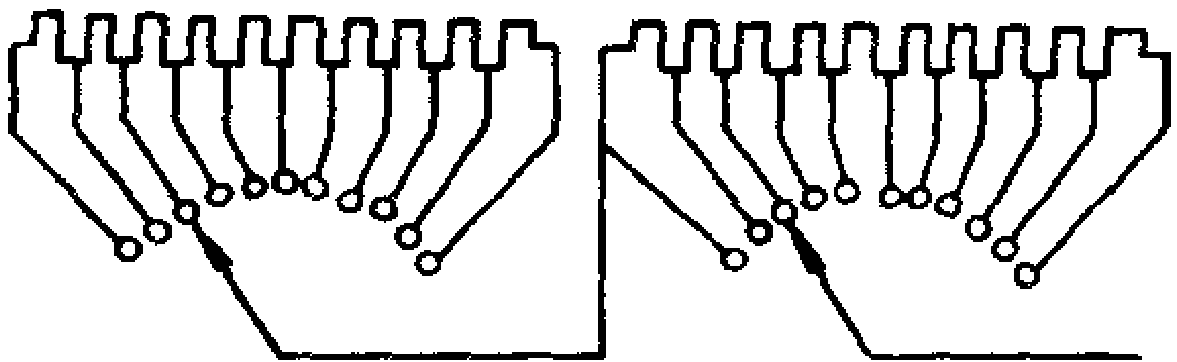


图 0－5－10　电位器结构图

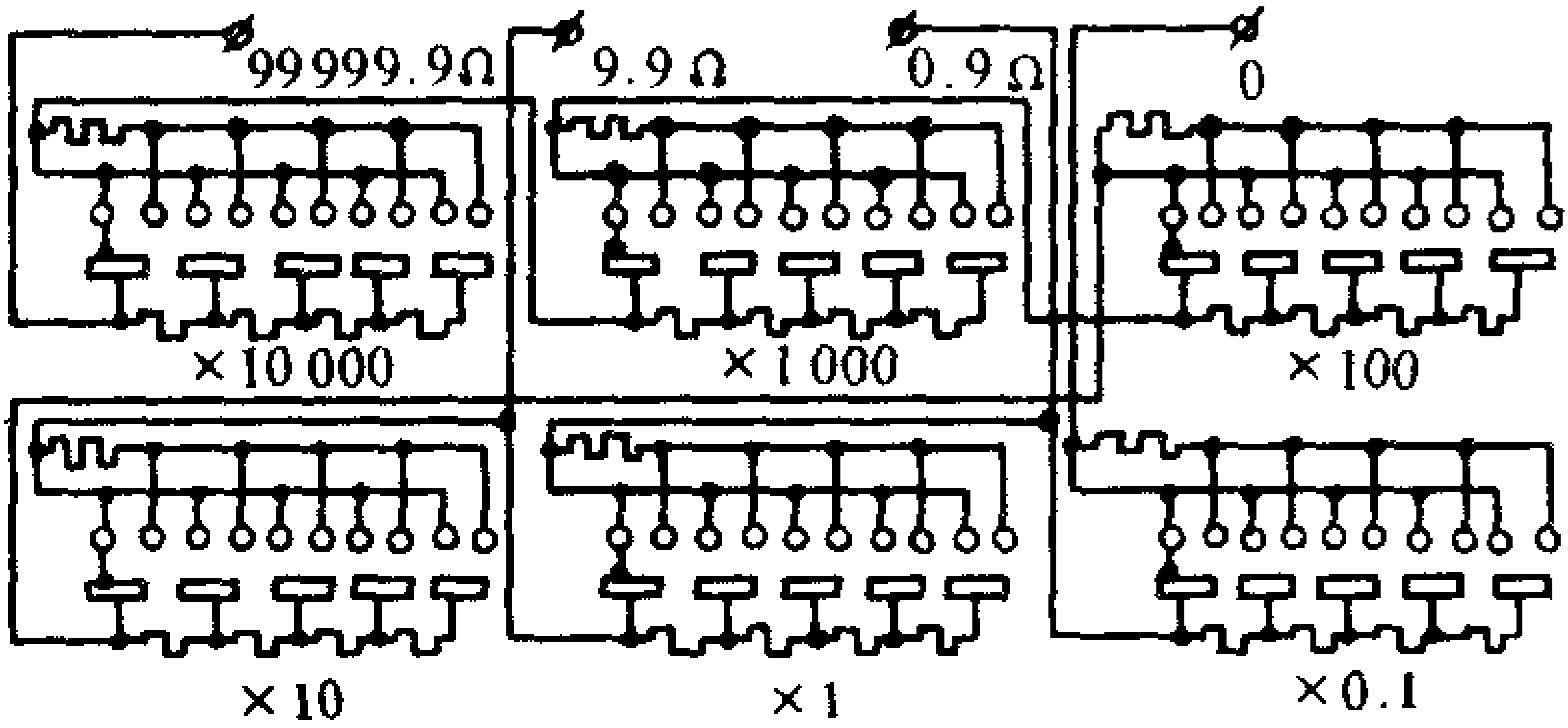
2．电阻箱

目前实验室较多用的旋转式电阻箱，是由许多锰铜丝绕成的电阻按十进位分别通过波段开关（1D10W）连接而成的．

如图 0－5－11(a)所示的电阻箱，每个开关上连接 10 个相同阻值的电阻（例如：0.1、1、10、…、1 000）串联而成，而如图 0－5－11(b)所示的每档电阻是由两种规格共 5 个电阻（一只 R 和四只 $2R$）所组成，R 为各档的倍率值（如：0.1、1、10、100、1 000、10 000），如常用的 ZX21 型电阻箱就是这种结构，电阻箱有六个旋钮，电阻值可变范围为



(a)



(b)

图 0－5－11　旋转式电阻箱结构图

$$0 \rightarrow 9 \times (0.1 + 1 + 10 + 100 + 1\ 000 + 10\ 000)\ \Omega$$

外形如图 0－5－12 所示.

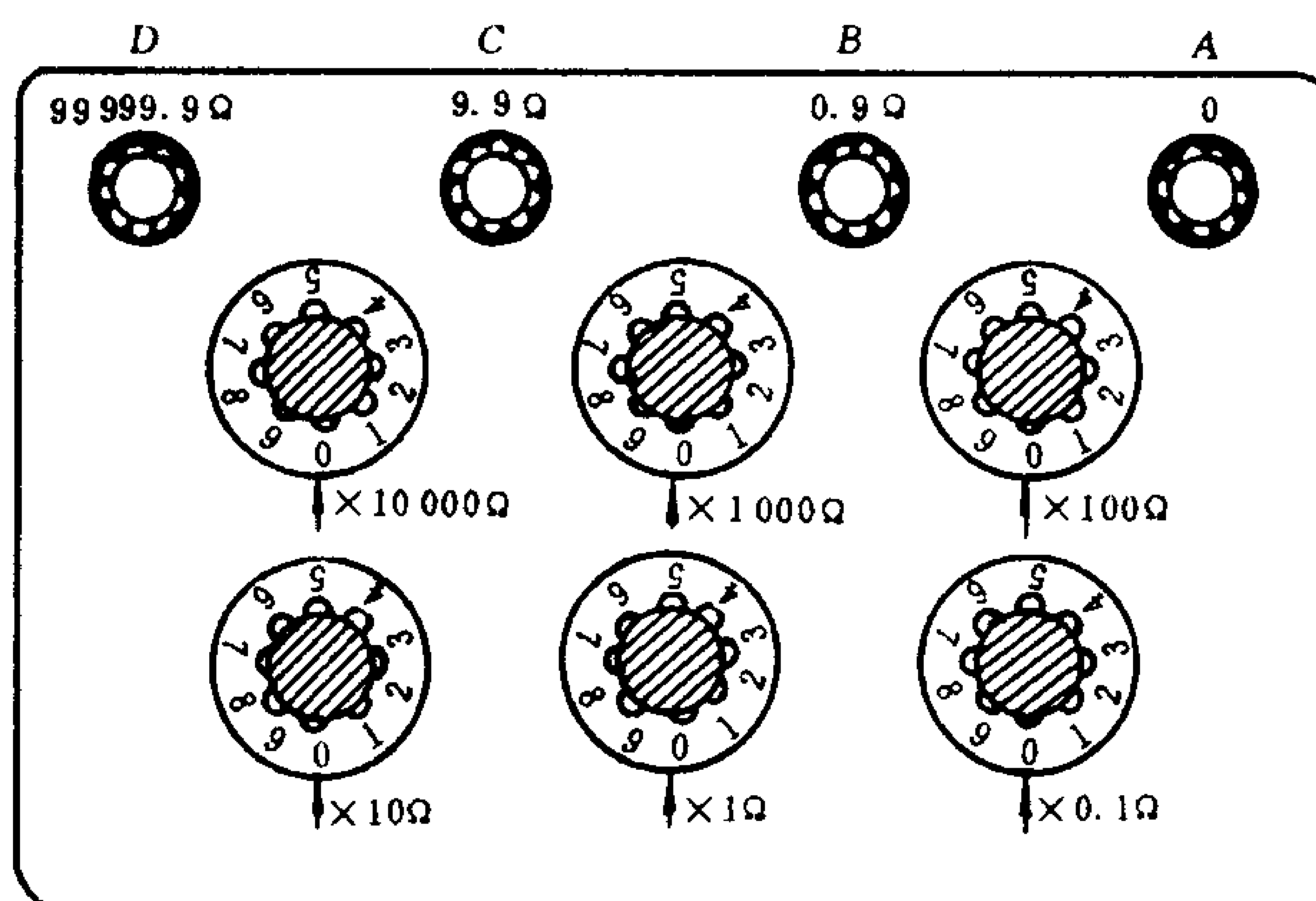


图 0－5－12　ZX21 型旋转式电阻箱

电阻箱读数为各挡示值与倍率乘积之和. 该型电阻箱在室温 20 ℃的准确度见下表(表中的 a 为准确度等级)：

9×(10 000	1 000	100	10	1	0.1) Ω
a%　0.1%	0.1%	0.5%	1%	2%	5%

上述电阻箱如果用在交流电路中，只有在低频(不超过1 kHz)下才能当作"纯电阻"，所以也称为直流电阻箱. 它的额定功率为 0.25 W，故各挡以 1 为首位的电阻额定功率为 0.25 W，以 2 为首位的电阻其额定功率为(0.25×2) W，当几挡联用时，额定电流按最大挡计算，根据

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \qquad (0-5-10)$$

可算出电阻箱所能承受的最大电流值. 各挡最大允许电流如表 0－5－2所示：

表 0-5-2　ZX21 型旋转式电阻箱各挡最大允许电流

R/Ω	$R\times10\ 000$	$R\times1\ 000$	$R\times100$	$R\times10$	$R\times1$	$R\times0.1$
I_{max}/A	0.005	0.015 8	0.05	0.158	0.5	1.58

例如：6 539 Ω 电阻最大允许通过的电流，应以 ×1 000 挡来计算：

$$I=\sqrt{\frac{P}{R}}=\sqrt{\frac{0.25\times2}{2\ 000}}\ \mathrm{A}=0.0158\ \mathrm{A}$$

电阻箱的误差主要包括电阻箱的基本误差和零电阻误差两个部分．零电阻值包括电阻箱本身的接线、焊接、接触等产生的电阻值．为了减少零电阻引起的误差，ZX21 型电阻箱增加了低电阻 B 接线柱，它与 $R\times0.1$ 盘相连，AB 端的最大电阻值为 0.9 Ω，同理，在 $R\times1$ 盘抽头设置了 C 接线柱，AC 端的最大电阻值为 9.9 Ω；D 端钮就是六个电阻档相互串联起来后的输出端，AD 端的最大电阻值为 99 999.9 Ω.

电阻箱的准确度 $a\%$ 各挡不同，均标在铭牌上，其允许基本误差 ΔR 为

$$\Delta R=R\times a\%$$

R 为电阻箱读数.

§5-4　直流电源

1．晶体管直流稳压电源

这种电源的稳定性好，内阻小，输出连续可调，功率也比较大，使用时要注意它能输出的最大电压和电流．如常用的 WYJ30 型，最大输出电压为 30 V，最大输出电流为 3 A.

2．铅蓄电池

电动势每单瓶为 2 V，实验室常用的蓄电池的额定电流为几个安培，容量为几十安培小时.

3．干电池

电动势为 1.5 V．常用干电池的有关数据见表 0-5-3.

表 0-5-3　常用干电池有关数据

型　号	容量/A·h	额定电流/mA
1	2	<300
2	0.5	100
5	0.2	50

使用电源时注意：

(1) 严防电源短路；

(2) 使用电流不得超过额定电流；

(3) 使用直流电源，注意正(+)、负(-)极，电流从正极流出，经外电路由负极流回.

§5-5　电磁学实验中用的标准器

1. 标准电池

标准电池是实验室常用的电动势标准器，在正确使用的情况下，这种电池的电动势极度稳定，电动势与温度的关系可以准确地掌握，不产生化学副反应，几乎没有极化作用，并且它的内阻在相当大的程度上不随时间而变化.

标准电池有国际标准电池(又称饱和式标准电池)和非饱和式标准电池两种.

(1) 饱和式标准电池

它的结构如图 0-5-13 所示. 电池的主体是一个密闭的 H 形玻璃容器，在它的两个下端各封入一个白金电极. 正极是水银(Hg)，水银上面是硫酸汞($HgSO_4$)和碎硫酸镉晶体$\left(CdSO_4+\frac{8}{3}H_2O\right)$所混成的糊状物，再上面是硫酸镉晶体，晶体上面是硫酸镉的饱和水溶液，作电解液. 电池的负极是镉汞合金，镉汞合金上面是硫酸镉晶体，

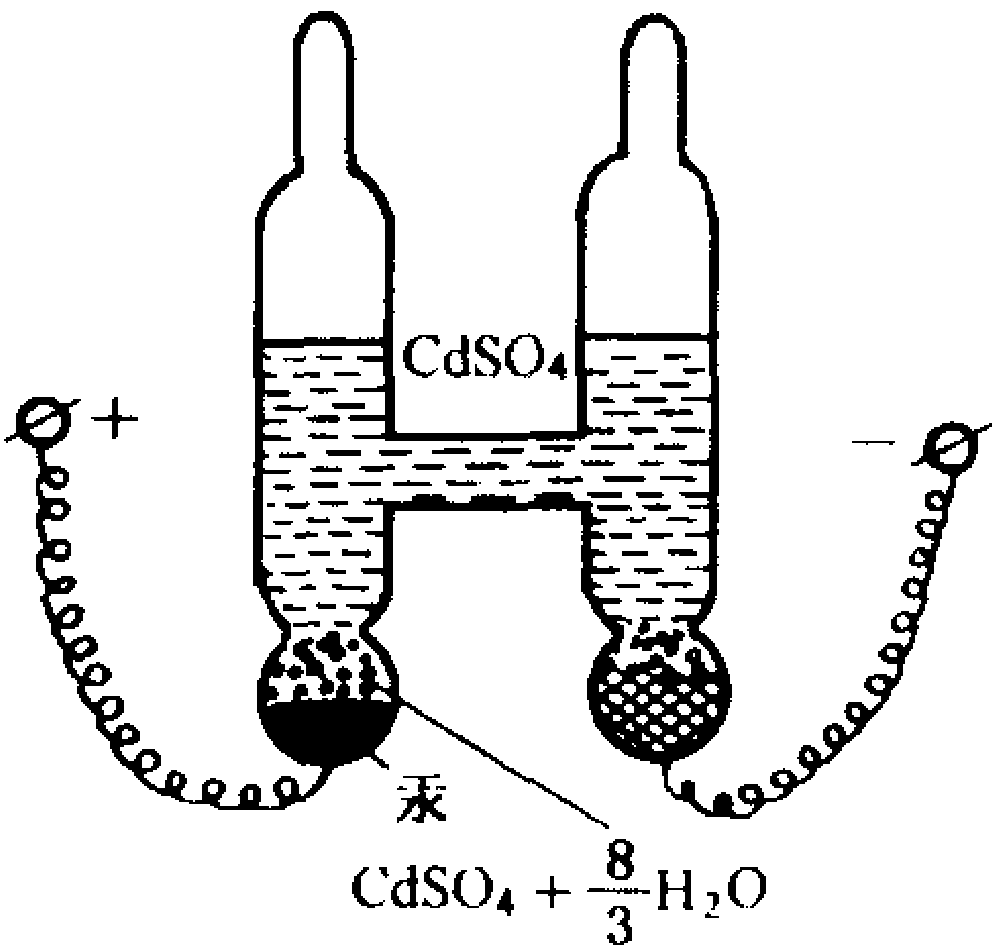


图 0-5-13　标准电池结构

再上面是硫酸镉饱和水溶液，容器的连接部分充满电解液．由于在电池内有硫酸镉的晶体存在，因此，在任何温度下硫酸镉溶液总是饱和的，电池容器在上端封口．国际标准电池的内阻在 500～1 000 Ω 范围内．电池的电动势在 0～40 ℃ 范围内可按下式进行修正：

$$E_t = E_{20} - E'$$

$$\{E'\}_V = [39.9\times(\{t\}_{℃} - 20) + 0.94\times(\{t\}_{℃} - 20)^2 -$$
$$0.009\times(\{t\}_{℃} - 20)^3]\times 10^{-6}$$

式中，E_t 为温度为 t（摄氏温度）时的电动势，E_{20} 为温度为 20 ℃ 时的电动势，$\{E'\}_V$ 表示 E' 以 V 为单位时的数值，$\{t\}_{℃}$ 表示 t 以℃为单位时的数值．

（2）非饱和标准电池

其结构与饱和式标准电池基本相同，只是电池内没有硫酸镉晶体．在温度高于 4 ℃ 时，用作电解液的硫酸镉溶液就不饱和．由于电流作用，电解液浓度要发生变化，因此这种电池的稳定性比饱和标准电池电动势的稳定性要低得多．但也有它的优点：内阻较小（不大于 600 Ω），温度系数很小．在 10～40 ℃ 范围内，每变化 1 ℃ 非饱和标准电池电动势的变化不超过 15 μV，故一般应用时可以不作温度修正．饱和式标准电池的温度系数要比非饱和式的电池大四倍．

标准电池按其准确度和稳定性可以分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三级，表 0－5－4列出了标准电池在 20 ℃ 时允许的电动势值、准确度和随时间变化的允许值．

表 0－5－4　标准电池的技术特性

类别	稳定度级别	E_{20}/V	一分钟内，最大允许流过的电流	在一年中电动势的允许变化	温度/℃		内阻值不大于 Ω	
			μA	μV	保证准确度	可使用于	新的	使用中的
饱和式	0.000 2	1.018 590 0～1.018 680 0	0.1	2	19～21	15～25	700	
	0.000 5	1.018 590 0～1.018 680 0	0.1	5	18～22	10～30	700	
	0.001	1.018 590～1.018 680	0.1	10	15～25	5～35	700	2 000
	0.005	1.018 55～1.018 68	1	50	10～30	0～40	700	2 000
	0.01	1.018 55～1.018 68	1	100	5～40	0～40	700	3 000

续表

类别	稳定度级别	E_{20}/V	一分钟内，最大允许流过的电流	在一年中电动势的允许变化	温度/℃		内阻值不大于 Ω	
			μA	μV	保证准确度	可使用于	新的	使用中的
非饱和式	0.005	1.018 80～1.019 30	1	50	15～25	10～30	500	
	0.01	1.018 80～1.019 30	1	100	10～30	5～40	500	3 000
	0.02	1.018 6～1.019 6	10	200	5～40	0～50	500	3 000

2. 标准电阻

标准电阻用锰铜线或锰铜条制成．锰铜是铜(84%)镍(4%)和锰(12%)的合金，电阻温度系数($\alpha \approx 0.000\ 01/℃$)很小．单个标准电阻一套有9个，$10^{-3} \sim 10^{5}\ \Omega$.

表 0－5－5　标准电阻的技术特性

准确度等级	0.005	0.01	0.02	0.05
电阻标称值/Ω	$10^{-3} \sim 10^{5}$	$10^{-3} \sim 10^{6}$	$10^{-4} \sim 10^{7}$	$10^{-4} \sim 10^{8}$
保证准确度的温度/℃	19～21	18～22	17～23	17～23
使用温度/℃	15～25	10～30	5～35	5～35
额定功率/W	0.1	0.1(或0.3)	0.1(或1)	1(或3)
最大允许功率/W	0.3	1(或3)	0.3(或3)	10(或30)

低值标准电阻为了减小接线电阻和接触电阻设有4个端钮，cc为电流端钮，pp为电压端钮．

使用标准电阻时应注意：

(1) 使用温度；

(2) 在小于额定功率下使用；

(3) 应放置在温度变化小的环境中．

3. 标准电容器

标准电容器有气体介质(空气、氮、真空)电容器和固体介质(熔融石英、白云母)电容器，常用的有空气电容器和云母电容器．云母电容器除做成固定式以外，还可以做成十进式电容箱．

标准电容器的准确度等级有 0.01、0.02、0.05、0.1 和 0.2 五级. 电容箱的等级较低,有 0.05、0.1、0.2、0.5 和 1 五级.

表 0－5－6　BR8 型标准云母电容器的技术特性

型　　号	BR8－1	BR8－2	BR8－3	BR8－4
额定值/μF	0.001	0.01	0.1	1
准确度/%	±0.5	±0.2	±0.2	±0.2
损耗角正切值	$<2.5\times10^{-3}$	$<5\times10^{-3}$	$<1\times10^{-3}$	$<1\times10^{-3}$
温度系数	$<2\times10^{-4}$/℃			
工作条件	额定 50 V,最大 250 V;频率 400～10 000 Hz			

使用标准电容器时应注意:

(1) 标准电容器一般有 3 个端钮,即两个测量电极(常记为"1"、"2")和一个绝缘的屏蔽外壳端钮(常记为"0"),一般使用时,屏蔽外壳端钮和一测量电极相接.

(2) 应考虑周围强电场对电容值的影响.

4. 标准电感器

标准电感器分有标准自感器和标准互感器两大类. 每类又分为定值和可变两种形式.

准确度等级分为 0.01、0.02、0.05、0.1 和 0.2 五种.

BH3 型标准互感

额定值/H: 1、0.1、0.01、0.001 四种.

准确度等级: 0.2～0.5.

表 0－5－7　BG6 型标准自感线圈的技术特性

额定值/H	1	0.1	0.01	0.001	0.000 1
直流电阻/Ω	<200	<20	<3	<1	<0.5
频率范围/Hz	950～1 050	50～1 500	50～3 500	50～10 000	50～10 000
基本误差/%	<±0.1				

实验一　制流电路与分压电路

目的

1. 了解基本仪器的性能和使用方法；

2. 掌握制流与分压两种电路的联结方法、性能和特点，学习检查电路故障的一般方法；

3. 熟悉电磁学实验的操作规程和安全知识.

仪器和用具

毫安计，伏特计，万用电表，直流电源，滑线变阻器，电阻箱，开关，导线.

阅读

绪论§5－1、§5－2、§5－3.

原理

电路可以千变万化，但一个电路一般可以分为电源、控制和测量三个部分. 测量电路是先根据实验要求而确定好的，例如要校准某一电压表，需选一标准的电压表和它并联，这就是测量线路，它可等效于一个负载，这个负载可能是容性的、感性的或简单的电阻，以 R_Z 表示其负载. 根据测量的要求，负载的电流值 I 和电压值 U 在一定的范围内变化，这就要求有一个合适的电源. 控制电路的任务就是控制负载的电流和电压，使其数值和范围达到预定的要求. 常用的是制流电路或分压电路. 控制元件主要使用滑线变阻器或电阻箱.

1. 制流电路

电路如图 1－1 所示，图中 E 为直流电源；R_0 为滑线变阻器，

Ⓐ为电流表；R_Z 为负载，本实验采用电阻箱；K 为电源开关．它是将滑线变阻器的滑动头 C 和任一固定端(如 A 端)串联在电路中，作为一个可变电阻，移动滑动头的位置可以连续改变 AC 之间的电阻 R_{AC}，从而改变整个电路的电流 I，

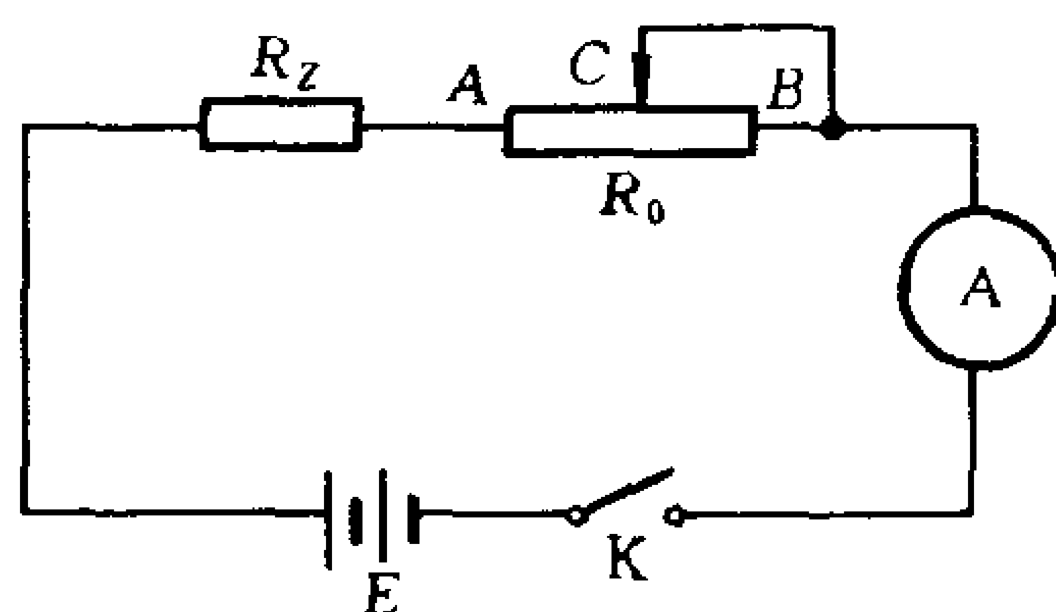


图 1－1　制流电路图

$$I=\frac{E}{R_Z+R_{AC}} \tag{1-1}$$

当 C 滑至 A 点 $R_{AC}=0, I_{max}=\frac{E}{R_Z}$，负载处 $U_{max}=E$；

当 C 滑至 B 点 $R_{AC}=R_0, I_{min}=\frac{E}{R_Z+R_0}, U_{min}=\frac{E}{R_Z+R_0}R_Z$

电压调节范围：　$\frac{R_Z}{R_0+R_Z}E \longrightarrow E$

相应的电流变化为　$\frac{E}{R_0+R_Z} \longrightarrow \frac{E}{R_Z}$

一般情况下负载 R_Z 中的电流为

$$I=\frac{E}{R_Z+R_{AC}}=\frac{\frac{E}{R_0}}{\frac{R_Z}{R_0}+\frac{R_{AC}}{R_0}}=\frac{I_{max}K}{K+X} \tag{1-2}$$

式中　$K=\frac{R_Z}{R_0}$，　$X=\frac{R_{AC}}{R_0}$.

图 1－2 表示不同 K 值的制流特性曲线，从曲线可以清楚地看到制流电路有以下几个特点：

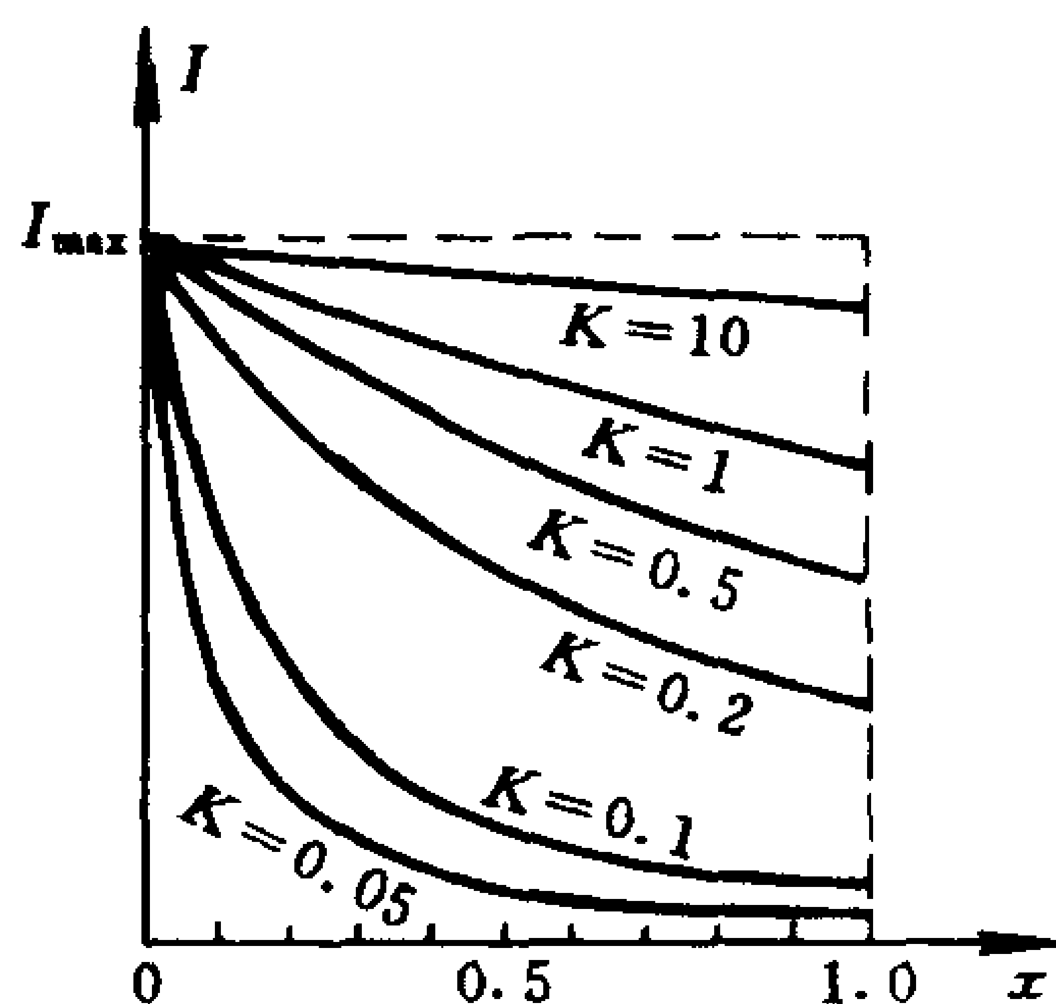


图 1-2　制流特性曲线图

(1) K 越大电流调节范围越小;

(2) $K\geqslant1$ 时调节的线性较好;

(3) K 较小时(即 $R_0\gg R_Z$),X 接近 0 时电流变化很大,细调程度较差;

(4) 不论 R_0 大小如何,负载 R_Z 上通过的电流都不可能为零.

细调范围的确定:制流电路的电流是靠滑线电阻滑动端位置移动来改变的,最少位移是一圈,因此一圈电阻 ΔR_0 的大小就决定了电流的最小改变量.

因为
$$I=\frac{E}{R_{AC}+R_Z}$$

对 R_{AC} 微分
$$\Delta I=\frac{\partial I}{\partial R_{AC}}\Delta R_{AC}=\frac{-E}{(R_{AC}+R_Z)^2}\cdot\Delta R_{AC}$$

$$|\Delta I|_{min}=\frac{I^2}{E}\cdot\Delta R_0=\frac{I^2}{E}\cdot\frac{R_0}{N}\qquad(1-3)$$

式中 N 为变阻器总圈数. 从上式可见,当电路中的 E、R_Z、R_0 确定后,ΔI 与 I^2 成正比,故电流越大,则细调越困难,假如负载的电流在最大时能满足细调要求,而小电流时也能满足要求,这就要使 $|\Delta I|_{max}$ 变小,而 R_0 不能太小,否则会影响电流的调节范围,所以只能使 N 变大,由于 N 大而使变阻器体积变得很大,故 N 又不

能增得太多，因此经常再串一变阻器，采用二级制流，如图 1－3 所示，其中 R_{10} 阻值大，作粗调用，R_{20} 阻值小作细调用，一般 R_{20} 取 $R_{10}/10$，但 R_{10}、R_{20} 的额定电流必须大于电路中的最大电流.

2．分压电路

分压电路如图 1－4 所示，滑线变阻器两个固定端 A、B 与电源 E 相接，负载 R_Z 接滑动端 C 和固定端 A（或 B）上，当滑动头 C

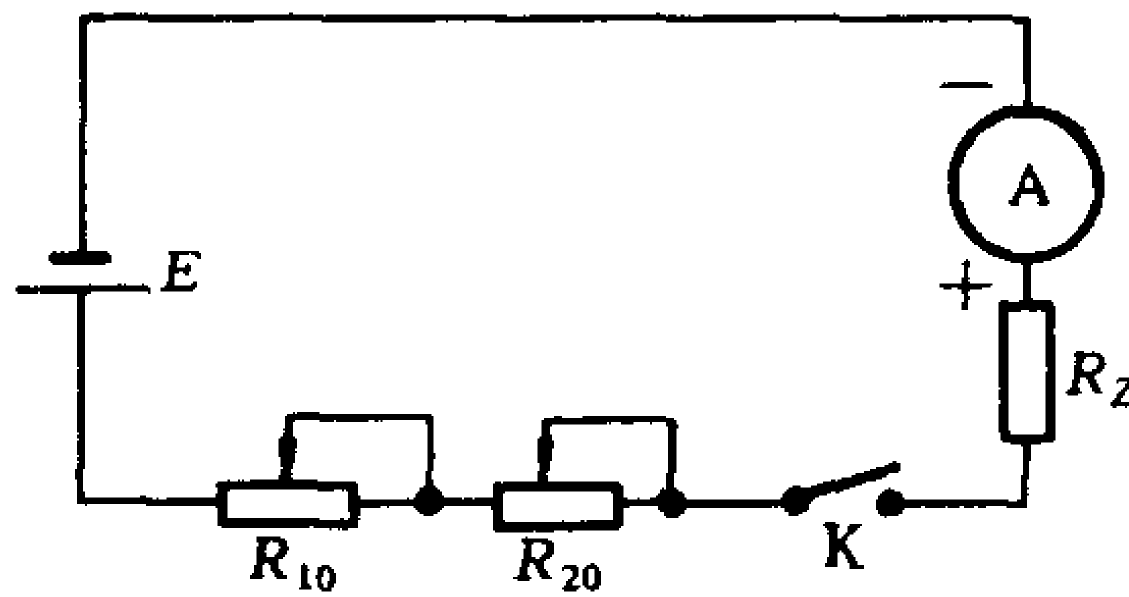


图 1－3　二级制流电路图

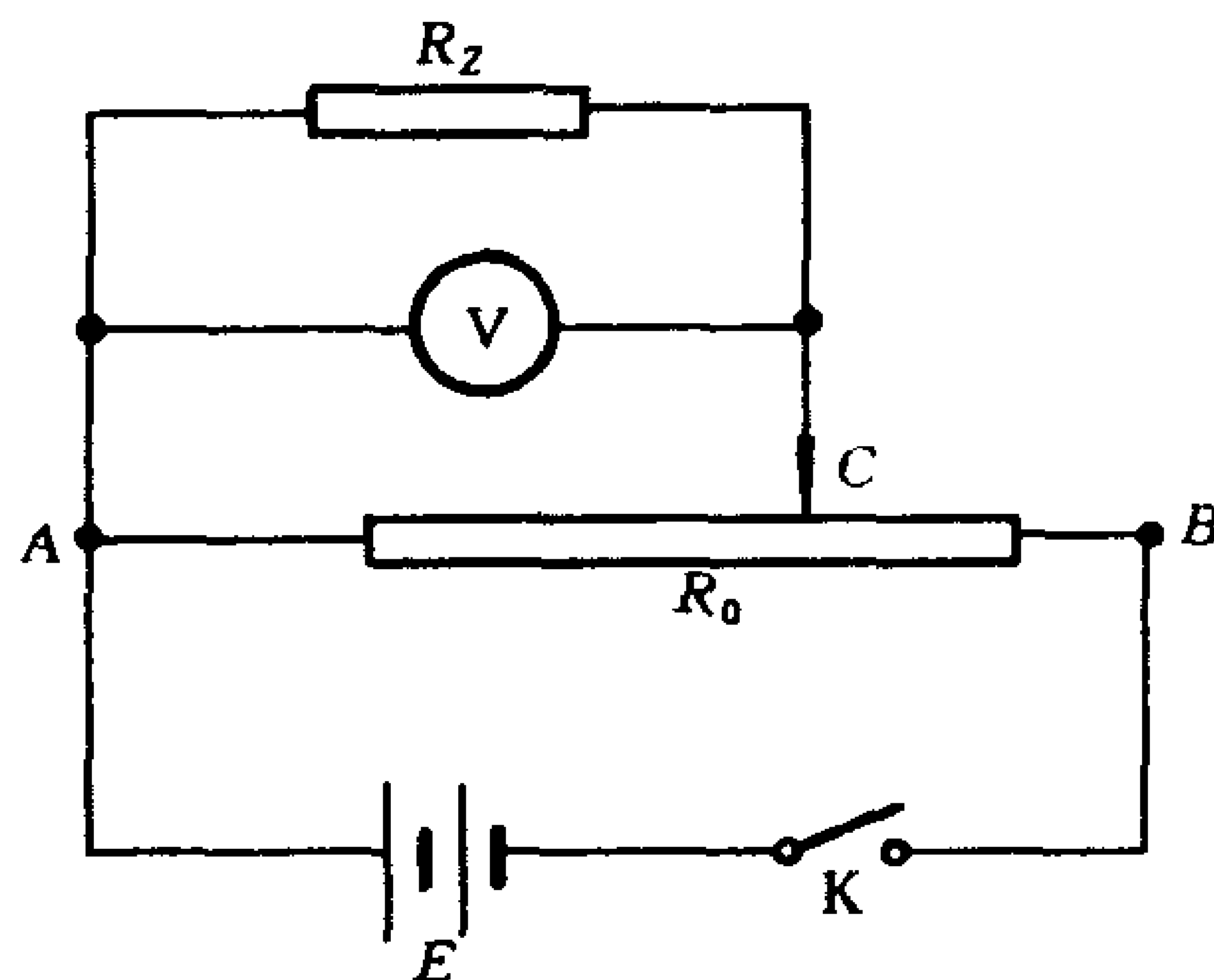


图 1－4　分压电路图

由 A 端滑至 B 端，负载上电压由 0 变至 E，调节的范围与变阻器的阻值无关. 当滑动头 C 在任一位置时，AC 两端的分压值 U 为

$$U=\frac{E}{\dfrac{R_Z\cdot R_{AC}}{R_Z+R_{AC}}+R_{BC}}\cdot\frac{R_Z\cdot R_{AC}}{R_Z+R_{AC}}=\frac{E}{1+\dfrac{R_{BC}(R_Z+R_{AC})}{R_Z\cdot R_{AC}}}$$

$$= \frac{ER_Z R_{AC}}{R_Z(R_{AC} + R_{BC}) + R_{BC}R_{AC}} = \frac{R_Z \cdot R_{AC} \cdot E}{R_Z \cdot R_0 + R_{BC}R_{AC}}$$

$$= \frac{\dfrac{R_Z}{R_0} \cdot R_{AC} \cdot E}{R_Z + \dfrac{R_{AC}}{R_0} \cdot R_{BC}} = \frac{K \cdot R_{AC} \cdot E}{R_Z + R_{BC} X} \tag{1-4}$$

式中 $R_0 = R_{AC} + R_{BC}$，$K = \dfrac{R_Z}{R_0}$，$X = \dfrac{R_{AC}}{R_0}$

由实验可得不同 K 值的分压特性曲线,如图 1－5 所示.

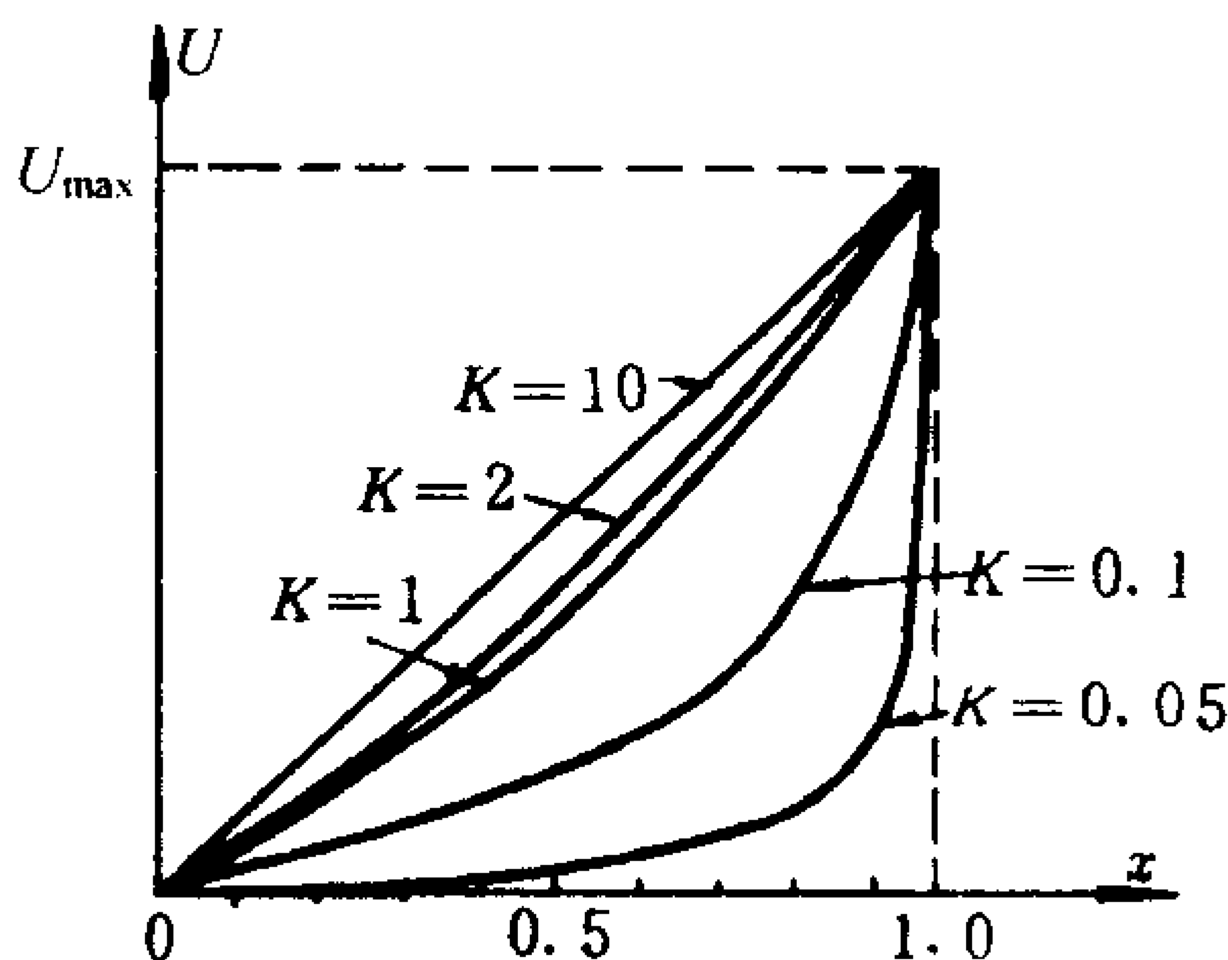


图 1－5 分压特性曲线图

从曲线可以清楚看出分压电路有如下几个特点:

(1) 不论 R_0 的大小,负载 R_Z 的电压调节范围均可从 $0 \to E$;

(2) K 越小电压调节越不均匀;

(3) K 越大电压调节越均匀,因此要电压 U 在 0 到 U_{max} 整个范围内均匀变化,则取 $K>1$ 比较合适,实际 $K=2$ 那条线可近似作为直线,故取 $R_0 \leqslant \dfrac{R_Z}{2}$ 即可认为电压调节已达到一般均匀的要求了.

当 $K \ll 1$ 时(即 $R_Z \ll R_0$),略去式(1－4)分母项中的 R_Z,近似有

$$U=\frac{R_Z}{R_{BC}}E$$

经微分可得：　　$|\Delta U|=\frac{R_Z\cdot E}{(R_{BC})^2}\cdot\Delta R_{BC}=\frac{U^2}{R_Z\cdot E}\Delta R_{BC}$

最小的分压量即滑动头改变一圈位置所改变的电压量，所以

$$\Delta U_{\min}=\frac{U^2}{R_Z\cdot E}\Delta R_0=\frac{U^2}{R_Z\cdot E}\cdot\frac{R_0}{N} \tag{1-5}$$

式中 N 为变阻器总圈数，R_Z 越小调节越不均匀.

当 $K\gg1$ 时（即 $R_Z\gg R_0$），略去式(1－4)中的 $R_{BC}\cdot X$ 近似有

$$U=\frac{R_{AC}}{R_0}E$$

对上式微分得　　$\Delta U=\frac{E}{R_0}\Delta R_{AC}$

细调最小的分压值莫过于一圈对应的分压值，所以

$$(\Delta U)_{\min}=\frac{E}{R_0}\Delta R_0=\frac{E}{N} \tag{1-6}$$

从上式可知，当变阻器选定后 E、R_0、N 均为定值，故当 $K\gg1$ 时 $(\Delta U)_{\min}$ 为一个常数，它表示在整个调节范围内调节的精细程度处处一样. 从调节的均匀度考虑，R_0 越小越好，但 R_0 上的功耗也将变大，因此还要考虑到功耗不能太大，则 R_0 不宜取得过小，取 $R_0=\frac{R_Z}{2}$ 即可兼顾两者的要求. 与此同时应注意流过变阻器的总电流不能超过它的额定值. 若一般分压不能达到细调要求可以如图 1－6 将两个电阻 R_{10} 和 R_{20} 串联进行分压，其中大电阻用作粗调，小电阻用于细调.

3. 制流电路与分压电路的差别与选择

(1) 调节范围

分压电路的电压调节范围大，可从 $0\to E$；而制流电路电压调节范围较小，只能从 $\frac{R_Z}{R_Z+R_0}\cdot E\to E$.

(2) 细调程度

当 $R_0 \leqslant \frac{R_Z}{2}$ 时，在整个调节范围内调节基本均匀，但制流电路可调范围小；负载上的电压值小，能调得较精细，而电压值大时调节变得很粗.

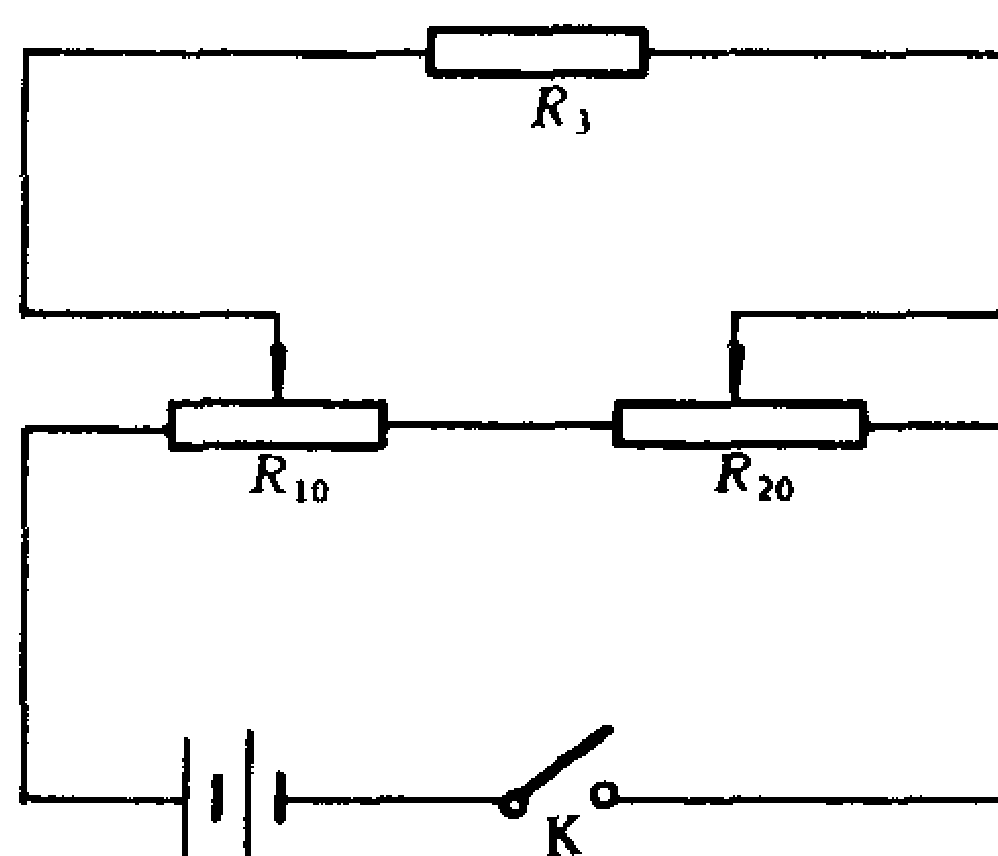


图 1-6 二段分压电路图

(3) 功率损耗

使用同一变阻器，分压电路消耗电能比制流电路要大.

基于以上的差别，当负载电阻较大，调节范围较宽时选分压电路；反之，当负载电阻较小，功耗较大，调节范围不太大的情况下则选用制流电路. 若一级电路不能达到细调要求，则可采用二级制流(或二段分压)的方法以满足细调要求.

实验内容

1. 仔细观察电表和万用表的度盘，记录下度盘下侧的符号及数字，说明其意义？说明所用电表的最大引用误差是多少？

2. 记下所用电阻箱的级别，如果该电阻箱的示值是 400 Ω 时，它的最大容许电流是多少？

3. 用万用电表测一下所用滑线变阻器的全电阻是多少？检查一下滑动端 C 移动时，R_{AC} 的变化是否正常？

4. 制流电路特性的研究

按图 1-1 电路进行实验，用电阻箱为负载 R_Z，取 K $\left(\text{即}\frac{R_Z}{R_0}\right)$ 为 0.1，确定 R_Z = ? 根据所用的毫安计的量限和 R_Z 的最大容许电流，确定实验时的最大电流 I_{max} 及电源电压 E 值. 注意，I_{max} 值应小于 R_Z 最大容许电流.

联结电路(注意电源电压及 R_Z 取值，R_{AC} 取最大值)，复查一

次电路无误后，闭合电源开关 K（如发现电流过大要立即切断电源！），移动 C 点观察电流值的变化是否符合设计要求.

移动变阻器滑动头 C，在电流从最小到最大过程中，测量 8～10 次电流值及相应 C 在标尺上的位置 l，并记下变阻器绕线部分的长度 l_0，以 $\frac{l}{l_0}\left(即\frac{R_{AC}}{R_0}\right)$为横坐标，电流 I 为纵坐标作图.

注意，电流最大时 C 的标尺读数为测量 l 的零点.

其次，测一下在 I 最小和最大时，C 移动一小格时电流值的变化 ΔI.

取 $K=1$，重复上述测量并绘图.

5. 分压电路特性的研究

按图 1－4 电路进行实验，用电阻箱当负载 R_Z，取 $K=2$ 确定 R_Z 值，参照变阻器的额定电流和 R_Z 的容许电流，确定电源电压 E 之值.

要注意如图 1－7 所示，变阻器 BC 段的电流是 I_Z 和 I_{CA} 之和，确定 E 值时，特别要注意 BC 段的电流是否大于额定电流.

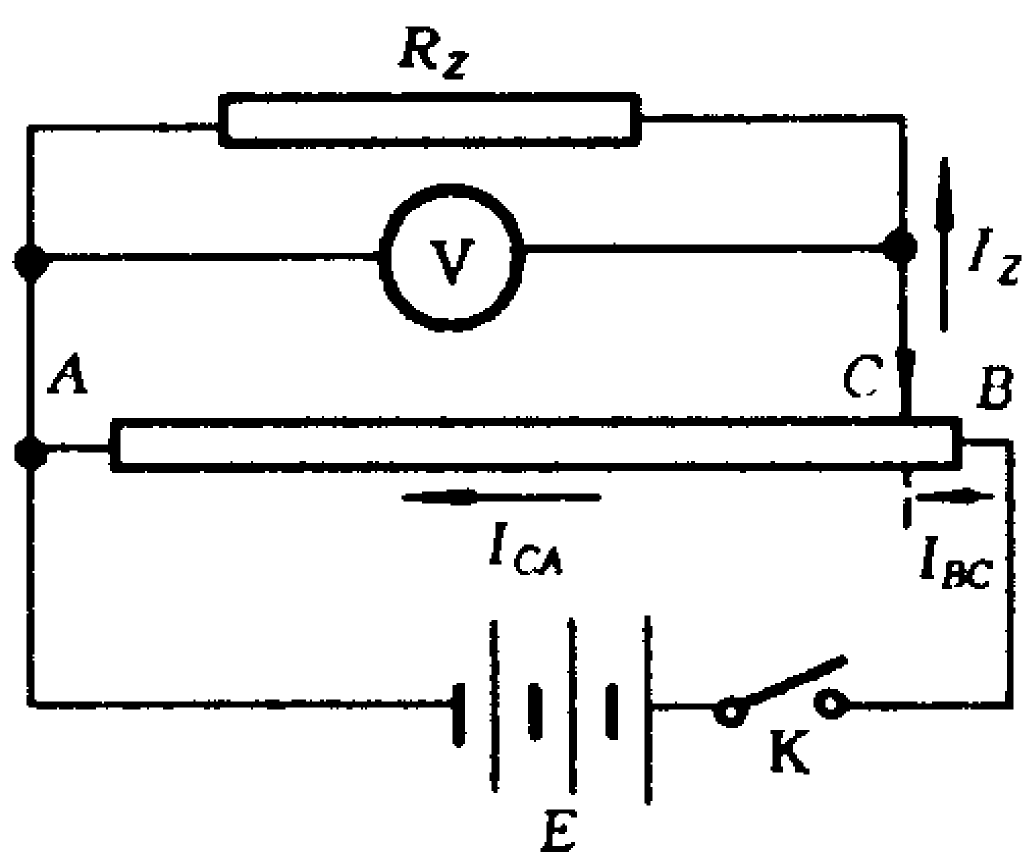


图 1－7

移动变阻器滑动头 C，使加到负载 R_Z 上的电压从最小变到最大，在此过程中，测量 8～10 次电压值 U 及 C 点在标尺上的位置 l，用 $\frac{l}{l_0}$ 为横坐标，U 为纵坐标作图.

其次，测一下当电压值最小和最大时，C 移动一小格时电压值的变化 ΔU.

取 $K=0.1$，重复上述测量并绘图.

6. 参照图 1－6、1－3 联结二段分压、制流电路，再测量 C 移动一小格时的 ΔU 和 ΔI.

7. 使用万用表检查电路故障

参照图 1－8,要求两组学生分别为对方设置故障,使接通电源时小灯不亮,由另一方检查.

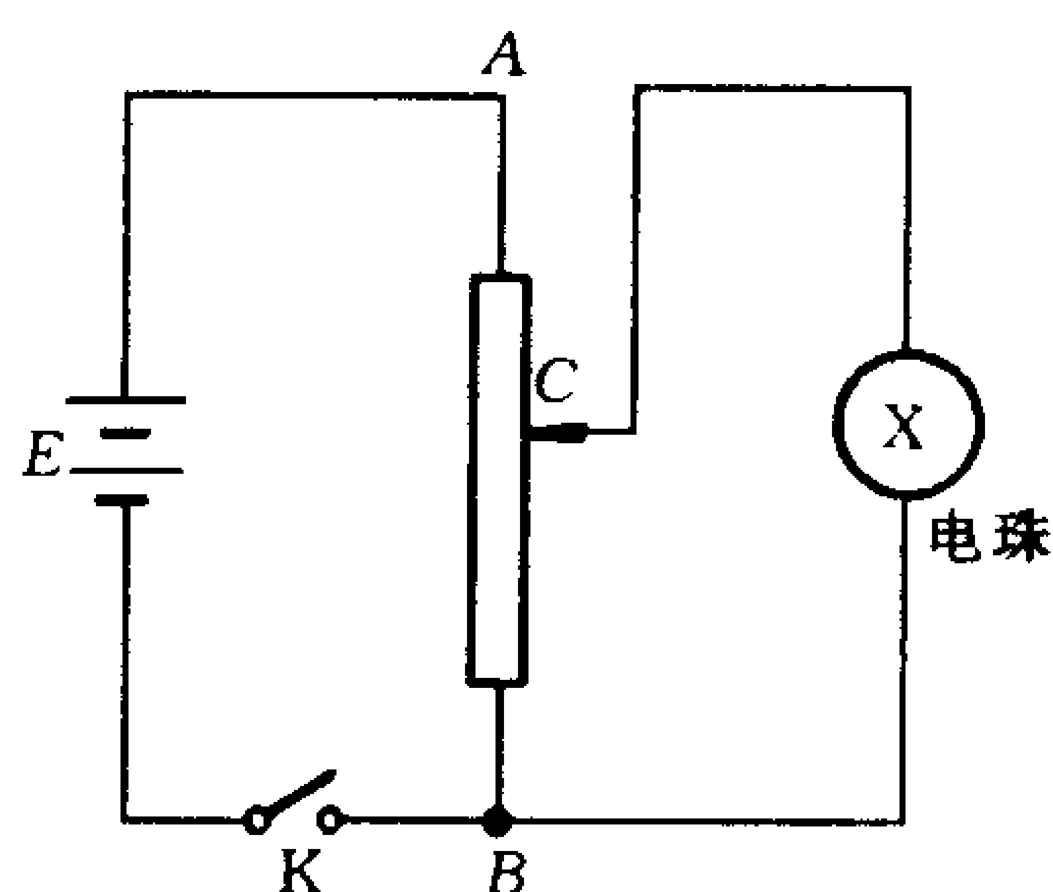


图 1－8　控制小电珠亮暗的分压电路

复习思考题

1. ZX21 型电阻箱的示值为 9 563.5 Ω,试计算它的允许基本误差,它的额定电流值,若示值改为 0.8 Ω,试计算它的允许基本误差?

2. 以下电路正确吗?若有错误说明原因,并改正之.

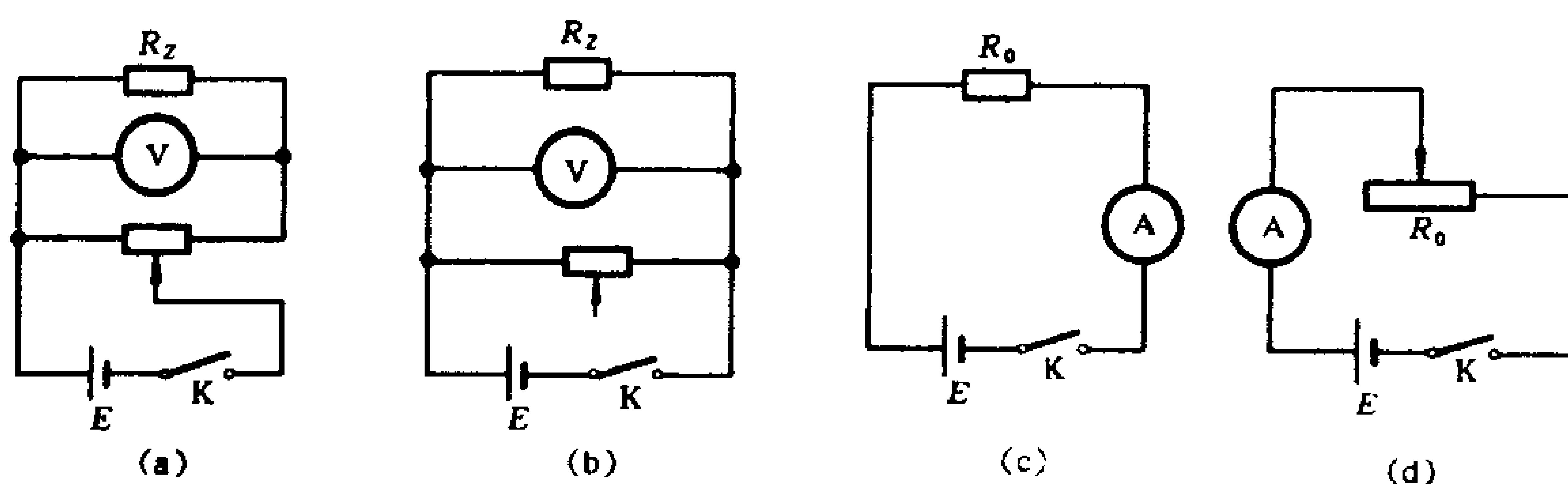


图 1－9

3. 从制流和分压特性曲线求出电流值(或电压值)近似为线性变化时,滑线电阻的阻值.

实验二　伏安法测电阻

目的

1. 学习由测量电压、电流求电阻值的方法(伏安法)及仪表的选择;

2. 学习减小伏安法中系统误差的方法.

仪器和用具

伏特计,安培计,检流计(可用微安计),滑线变阻器,直流电源,待测电阻(两个),开关和导线.

原理

如图 2－1 所示,测出通过电阻 R 的电流 I 及电阻 R 两端的电压 U,则根据欧姆定律,可知

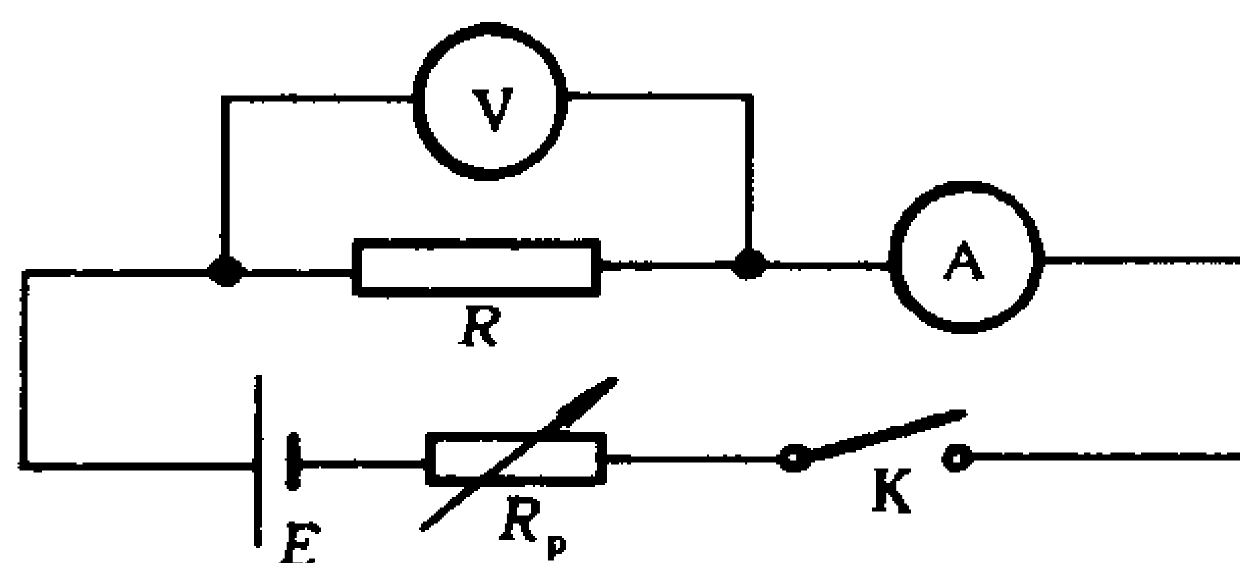


图 2－1

$$R=\frac{U}{I}$$

以下讨论此种方法的系统误差问题.

1. 测量仪表的选择

在电学实验中,仪表的误差是重要的误差来源,所以要选取适用的仪表.

(1) 参照电阻器 R 的额定功率确定仪表的量限

设电阻 R 的额定功率为P,则最大电流 I 为

$$I=\sqrt{\frac{P}{R}} \tag{2-1}$$

为使电流计的指针指向度盘的$\frac{2}{3}$处(最佳选择),电流计的量限为$I\Big/\frac{2}{3}$,即$\sqrt{\frac{P}{R}}\times\frac{3}{2}$.

设 $R\approx 100\ \Omega, P=\frac{1}{8}$ W,则 $I=0.035$ A,而 $I\times\frac{3}{2}=0.053$ A 所以电流计取量限为 50 mA 的毫安计较好.

电阻两端电压为 $U=IR=3.5$ V,而 $U\times\frac{3}{2}=5.3$ V,所以电压计取量限 5 V 的伏特计较好.

(2) 参照对电阻测量准确度的要求确定仪表的等级

假设要求测量 R 的相对误差不大于某一E_R,则按误差传递公式,可有

$$E_R=\left[\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2+\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2\right]^{1/2}$$

按误差等分配原则取

$$\frac{\Delta U}{U}=\frac{\Delta I}{I}=\frac{E_R}{\sqrt{2}} \tag{2-2}$$

对于准确度等级为 a,量限为 X_{max} 的电表,其最大绝对误差为 Δ_{max},则

$$\Delta_{max}=X_{max}\times\frac{a}{100}$$

参照此关系和式(2-2),可知电流计等级 a_I 应满足

$$a_I\leqslant\frac{E_R}{\sqrt{2}}\times\frac{I}{I_{max}}\times 100 \tag{2-3}$$

电压计的等级 a_U 应满足

$$a_U\leqslant\frac{E_R}{\sqrt{2}}\times\frac{U}{U_{max}}\times 100 \tag{2-4}$$

对前述实例($I=0.035$ A, $I_{max}=0.05$ A, $U=3.5$ V, $U_{max}=5$ V),则当要求 $E_R\leqslant 2\%$时,必须

$$a_I\leqslant 0.99,\ a_U\leqslant 0.99$$

即取 0.5 级的毫安计、伏特计较好,取 1.0 级也勉强可以.

2. 两种联线方法引入的误差

如图 2－2 所示,伏安法有两种联线方法. 内接法——电流计在电压计的里侧,外接法——电流计在电压计的外侧.

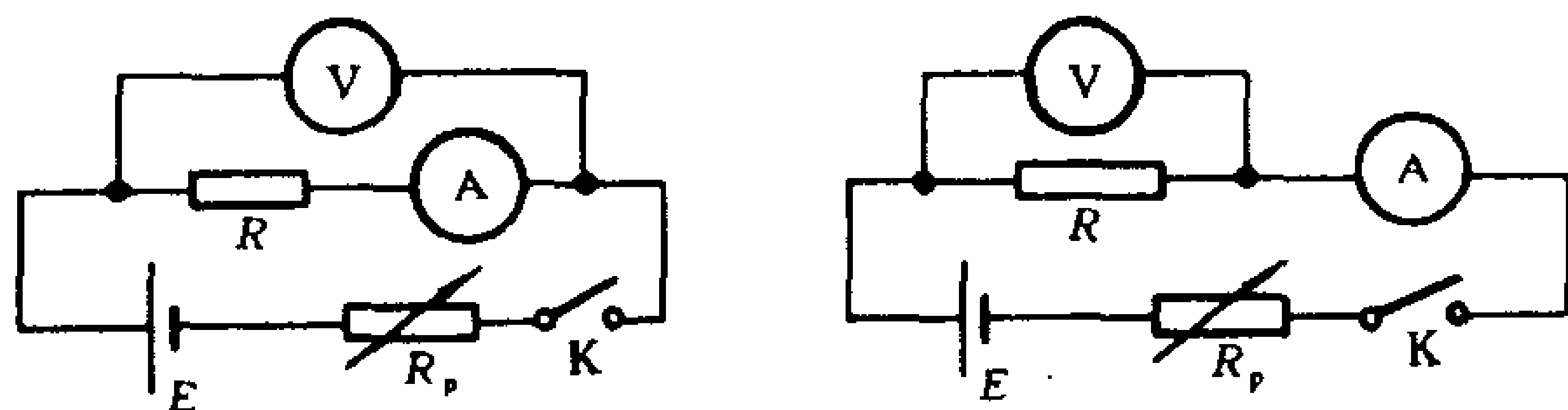


图 2－2

(1) 内接法引入的误差

设电流计的内阻为 R_A,回路电流为 I,则电压计测出的电压值

$$U = IR + IR_A = I(R + R_A) \tag{2-5}$$

即电阻的测量值 R_x 是

$$R_x = R + R_A \tag{2-6}$$

可见测量值大于实际值,测量的绝对误差为 R_A,相对误差为$\dfrac{R_A}{R}$.

当 $R_A \ll R$ 时,可用内接法.

(2) 外接法引入的误差

设电阻 R 中的电流为I_R,又设伏特计中流过电流为 I_V,伏特计内阻为 R_V,则电流计中电流

$$I = I_R + I_V = U\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_V}\right) \tag{2-7}$$

因此电阻 R 的测量值R_x 是

$$R_x = \frac{U}{I} = R \cdot \frac{R_V}{R + R_V} \tag{2-8}$$

由于 $R_V<(R+R_V)$，所以测量值 R_x 小于实际值 R，测量的相对误差

$$\frac{R_x - R}{R} = -\frac{R}{R+R_V}$$

式中负号是由于绝对误差是负值，只有当 $R_V \gg R$ 时才可以用外接法.

3. 用补偿法测电压消除外接法的系统误差

图2－3为用补偿法测电压的电路，分压器 R_1 的滑动端 C 通过检流计G和待测电阻 R 的 B 端相接，调 C 点位置使检流计G中无电流通过，这时 $U_{AB}=U_{DC}$. 用电压计测出 DC 间电压，它等于电阻 R 两端的电压，而流过电流计中的电流仅是电阻的 I_R 而无电压计的 I_V，于是通过 U_{DC} 与 U_{AD} 的电压补偿，将电压计由 AB 间移至 DC 间，消除了由于电压计中的电流引入的误差. 加入电阻 R_2 是为了使滑动端 C 不在 R_1 的一端.

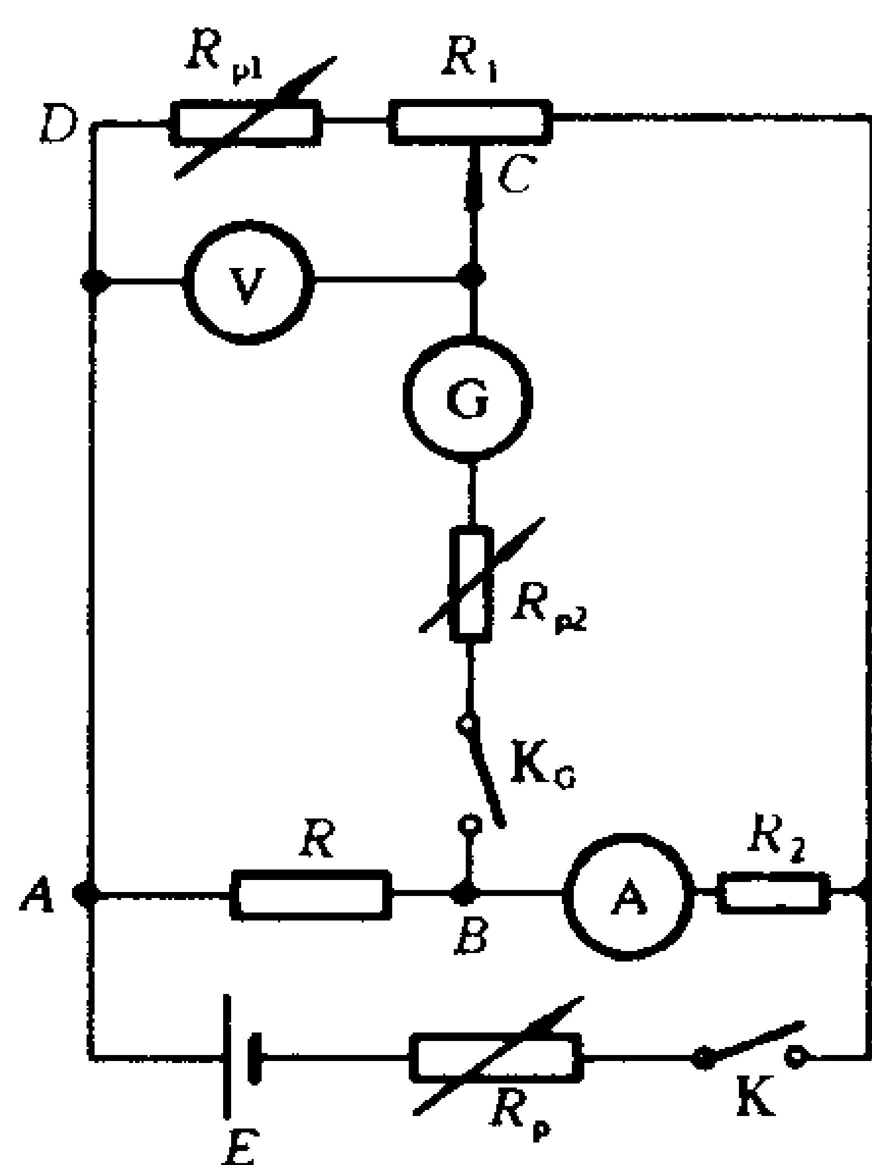


图 2－3

实验内容

1. 用内接法和外接法测量二待测电阻的阻值，要求测量的相对不确定度小于5%

首先用万用电表测一下电阻值，再选取合适的电表去测量.

调节 R_p 使电流由小到大，测量几个不同电流、电压值.

2. 用补偿法去测量

参照图2－3联接电路，开始测量时先闭合开关K，调节 R_p 得到合适的电流；其次用万用表测 BC 间电压，调节 R_{p1} 和 C 点位置使 $U_{BC}=0$，再将 R_{p2} 调到最大(降低检流计灵敏度)，闭合 K_G 观察检流计的偏转，调 R_{p1} 和 C 的位置使偏转为零，最后将 R_{p2} 调节到最小再检查.

测量几个不同电流值时的电压值.

3. 绘制上述三种方法测量数据的电压、电流图线，并从直线斜率求出待测电阻值，并计算标准不确定度.

4. 对比分析上述结果.

回答问题

1. 在此实验中如何确定滑线变阻器的规格？
2. 设计一个测电表内阻的方案(电路及步骤).

测量举例

实验用仪器：电流表(No.7467)　0.5级，0～300 mA，
电压表(No.440611)　0.5级，0～1 V.
待测电阻 R 标称值 3 Ω.

1. 内接法：

U/V	0.649	0.710	0.781	0.855	0.912	0.986
I/mA	158.9	174.0	190.4	210.2	222.6	242.6

2. 外接法：

U/V	0.662	0.712	0.782	0.841	0.913	0.988
I/mA	172.0	184.6	202.4	218.2	236.4	256.0

3. 补偿法：

U/V	0.950	0.893	0.827	0.780	0.741
I/mA	246.1	231.4	214.6	203.2	192.1

用最小二乘法计算 R 及 $s(R)$[①]

1. $R=4.083\ \Omega, s(R)=0.013\ \Omega$

2. $R=3.858\ \Omega, s(R)=0.005\ \Omega$

3. $R=3.855\ \Omega, s(R)=0.009\ \Omega$

标准不确定度计算：不确定度来源主要有(1)重复测量 $u_A(R)=s(R)$，(2)电表的误差.（电表内阻引入的不确定度未计入).

由于电压表 $\Delta=0.5\%\times1\ \mathrm{V}=0.005\ \mathrm{V}$，$u_B(V)=0.005\ \mathrm{V}/\sqrt{3}=0.0029\ \mathrm{V}$

由于电流表 $\Delta=0.5\%\times300\ \mathrm{mA}=1.5\ \mathrm{mA}$，$u_B(I)=1.5\ \mathrm{mA}/\sqrt{3}=0.87\ \mathrm{mA}$

电表引入的 $u_B(R)=R\sqrt{\left(\frac{u(U)}{U}\right)^2+\left(\frac{u(I)}{I}\right)^2}$，$U$、$I$ 取测量的中点值.

三种方法的数据处理综合为下表：

单位 Ω	1	2	3
$u_A(R)$	0.013	0.005	0.009
$u_B(R)$	0.022	0.021	0.020
$u_c(R)$	0.026	0.022	0.022

结果：

1. $R=4.083\pm0.026\ \Omega$

2. $R=3.858\pm0.022\ \Omega$

3. $R=3.855\pm0.022\ \Omega$

[附记]

对于 $y=a+bx$ 直线，当 $a=0$ 时的拟合要满足 $\sum(y_i-bx_i)^2=$ 极小，则

---

① 见后面的附记.

$$\frac{\mathrm{d}\sum(y_i - bx_i)^2}{\mathrm{d}\hat{b}} = 0$$

求出
$$\hat{b} = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2}$$

$$s_b = \frac{\sum x_i}{\sum x_i^2}\sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{b}x_i)^2}{n-1}}$$

在此
$$U = y, I = x, R = \hat{b}, s(R) = s_b$$

实验三　伏安法测二极管的特性

目的

1. 掌握分压器和限流器的使用方法；
2. 熟悉测量伏安特性的方法；
3. 了解二极管的正向伏安特性.

仪器和用具

稳压电源、电流表、电压表、滑线变阻器、可变电阻箱、开关、待测二极管.

原理

二极管的伏安特性可用如图 3－1 所示的特性曲线来描绘.

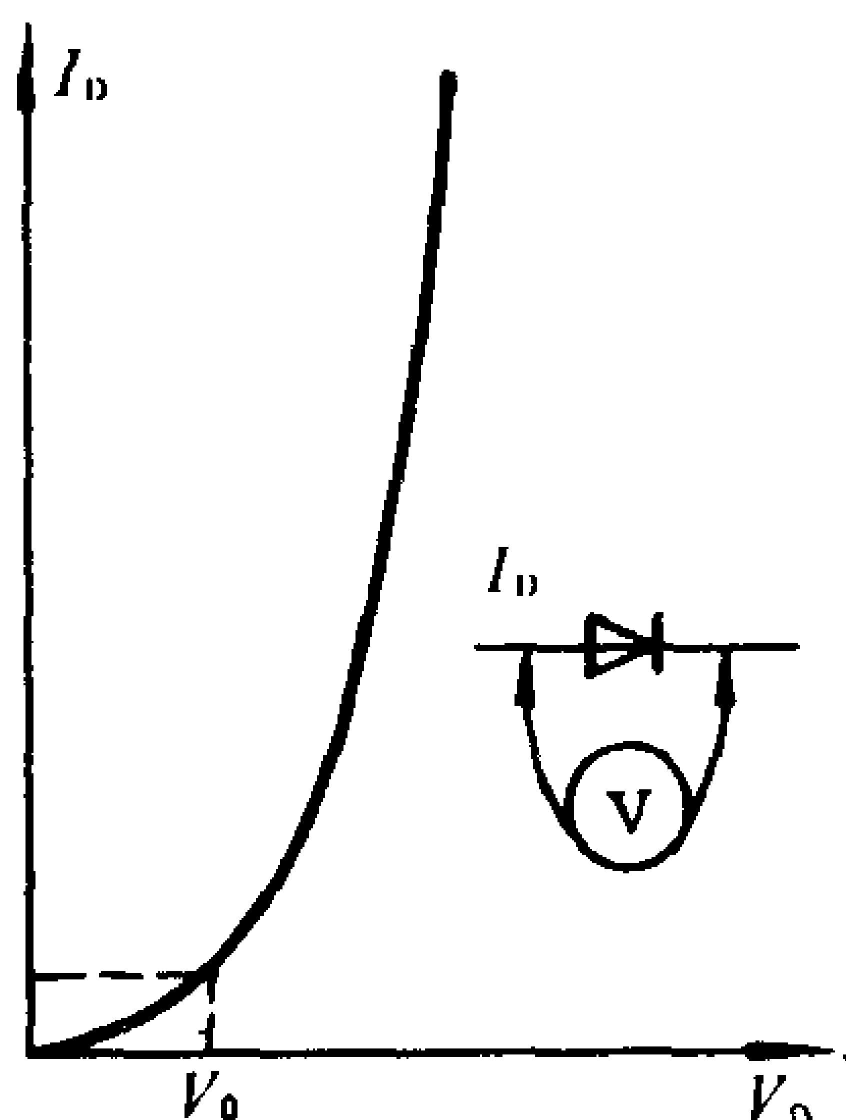


图 3－1　二极管正向伏安特性曲线

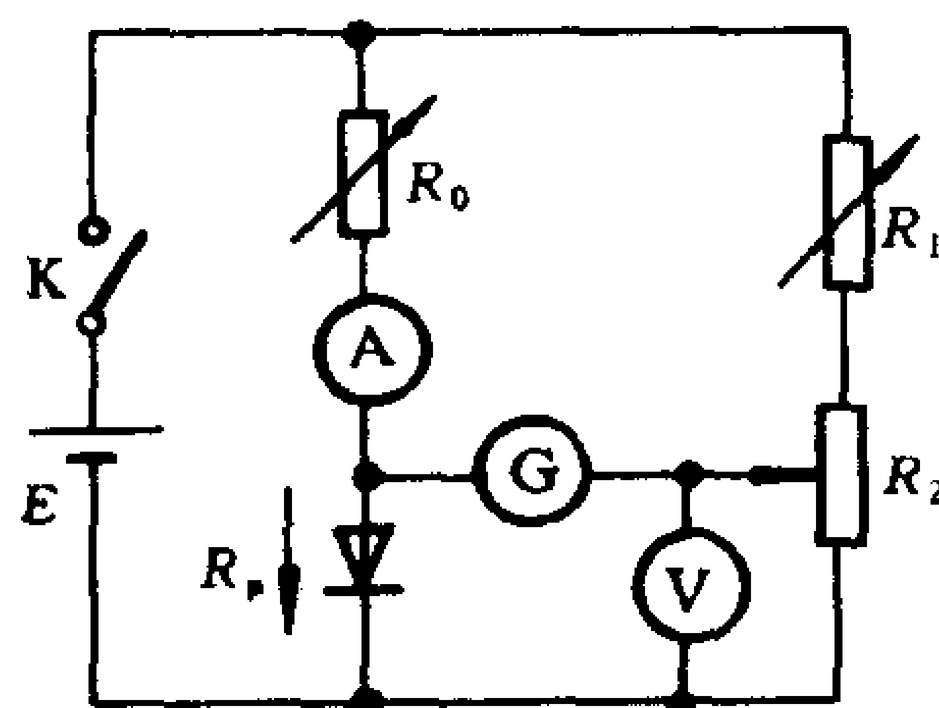


图 3－2　二极管正向特性测试线路

用伏安法测量二极管的特性可采用图 3－2 所示的线路，当检流计 G 指零时，电压表 V 指示着二极管两端的正向电压值，电流表 A 指示着流过二极管的正向电流. R_0 为限流器（即电阻箱），改

变电阻箱的阻值可改变正向电流值. R_1 为限流器,R_2 为分压器,改变 R_1 和 R_2 可输出不同的电压值,并由电压表指示,目的是与二极管两端的电压进行比较,如果 G 指示为零,电压表指示值就是二极管端压 U_D. 通常 R_1 值越大,可测量的 U_D 越小,R_1 值很小甚至为零,可测量较大的 U_D 值. 此外 R_1 的微小调节可使电压表 V 指示值(即输出电压值)有微小的变化,常称为电压微调电阻.

如果将稳压电源 E 的极性反向连接,按上述相同方法测量,也可得到 U_D 与 I_D 的许多组数据,但这些数据表征着二极管的反向特性.

步骤和要求

根据图 3-2 连接线路,并预置 R_0 为最大值,R_1 为最大值,R_2 的输出为零,注意电表的极性!

接通电源,注意观察有无异常情况发生,否则马上切断电源,根据现象检查故障.

选择各种 U_D 值(0.1~0.6 V),对于每种 U_D 值,调节 R_0,使检流计指示为零,记下电流表的电流值.

将图 3-2 中的电源反接 U_D 从 1~9 V,测量反向特性.

根据反向特性表的数据可求得二极管的反向饱和电流 I_c 值,根据正向特性表的数据,令 $x = U_D$, $y = \ln\left(\frac{I_D}{I_c}+1\right)$作图,应该得到一条过零的直线,同时可观察 x 与 y 的线性符合程度. 从 $x-y$ 直线中求得斜率 b.

预习思考题

1. 二极管伏安特性的测试线路中,电压表能否直接连在二极管的两个端点? 检流计的作用是什么?

2. 接通电源前各预置值选择的原则是什么?

复习思考题

1. 二极管正向导通时的正向电压降大致等于多少? 反向饱和电流值为多少?

2. 如何用最小二乘法计算方法求 x 与 y 的关联系数并计算本实验测量的精密度(s_b/b).

3. 如果没有检流计,试画出二极管特性测试的线路图,并说明线路图中存在的系统误差.

4. 你对 R_0、R_1、R_2 的调节有什么体会? 各自的主要功能是什么?

5. 如果"仪器和用具"中没有电流表,而电压表、检流计和可变电阻箱、滑线变阻器可任意增加数量,试设计二极管伏安特性测试的实验线路图.

实验四　静电场的描绘

目的

1. 学习用模拟法研究静电场；

2. 描绘二种场结构的等势线.

仪器和用具

直流稳压电源、电压表、检流计(或微安计)、滑线变阻器、记录装置、导电纸、电极、米尺和游标尺、开关及导线.

原理和实验装置

1. 静电场与稳恒电流场

带电体在它周围的空间产生电场,可以用电场强度 E 或电势 U 的空间分布来描述,现在讨论的静电场的描绘是探索其电势 U 的空间分布,因为电势是标量,在测量上要简便些. 但是直接测量静电场中各点的电势是很困难的,这是因为静电场中不会有电流,不能用直流电表直接测量,除非用静电式仪表测量,但用静电式仪表测量就要用到金属制的探头,而伸入静电场中的金属探头将使静电场发生显著的变化.

用稳恒电流场模拟静电场的实验设计,使静电场的实验研究比较容易进行.

静电场和电流场本是不同的场,但是可以看到它们的相似性,例如它们都引入电势 U,而电场强度 $\boldsymbol{E} = -\nabla U$;它们都遵守高斯定理;对一静电场有

$$\oint\!\!\!\oint_{(S)} \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \quad (\text{闭合曲面 } S \text{ 内无电荷})$$

对一稳恒电流场,则有

$$\oiint_{(S)} \boldsymbol{j} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \quad \text{（闭合曲面 } S \text{ 内无电源）}$$

静电场与稳恒电流场的这种相似性给人们一个启示．如图4－1(a)由几个电势为 U_1、U_2、U_3 的带电体激发的静电场中 P 点的电势为 U 时；那么，将形状与带电体相同的良导体置于导电介质中的相同位置，加上直流电压，使它们的电势也是 U_1、U_2、U_3[图4－1(b)]，则在导电介质中对应 P 点位置的 P' 点的电势 U' 将和 U 相同．反过来如果测量出稳恒电流场中 P' 点的电势为 U'，则相应静电场中 P 点的电势 U 将和 U' 相同．这表示通过测量稳恒电流场的电势分布可以了解相应静电场的电势分布，实验结果表示这样模拟是恰当的．

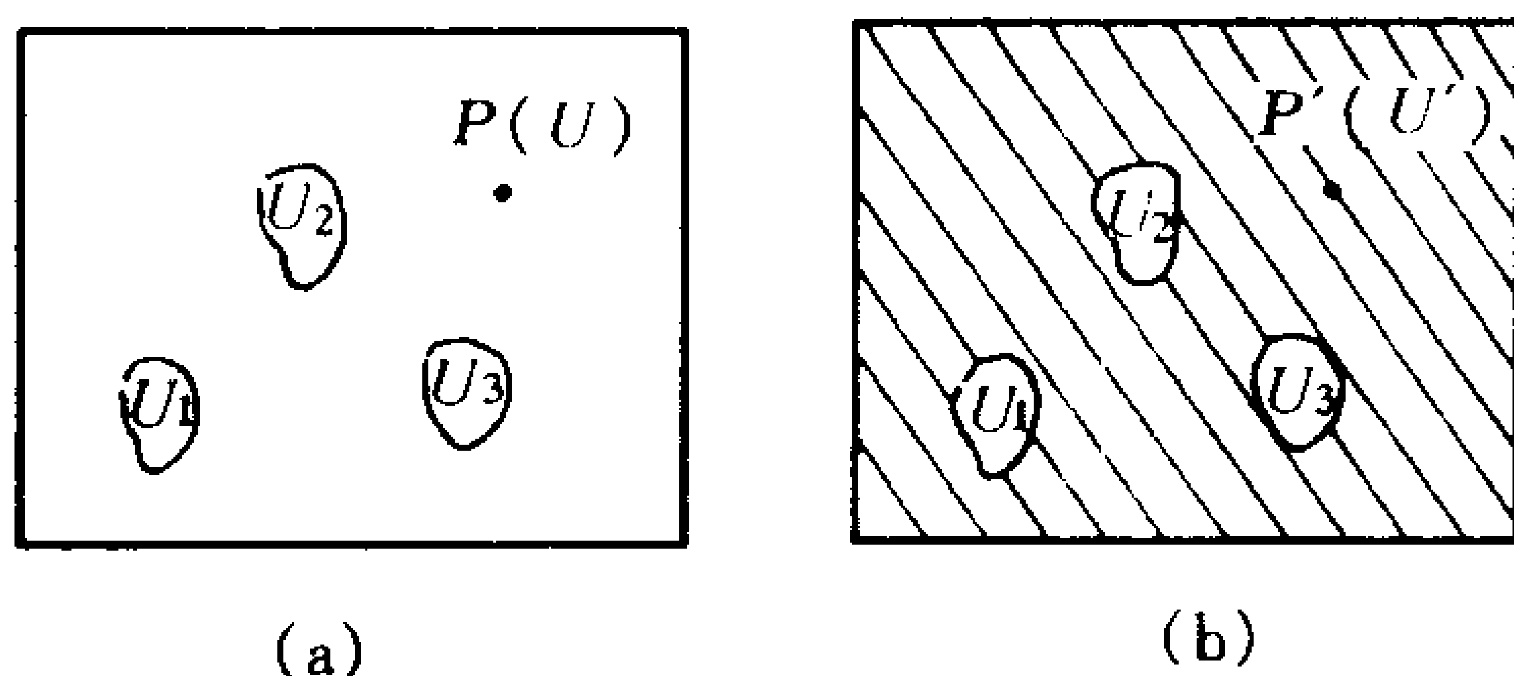


图4－1

这种利用规律形式上的相似，由一种测量代替另一种测量的方法就是模拟法．

2．二共轴无限长均匀带电圆柱体间的静电场

如图4－2，设内圆柱半径为 r_a，电势为 U_a；外环内半径为 r_b，电势为 U_b，则静电场中距离轴心为 r 处的电势 U_r 可表示为：

$$U_r = U_a - \int_{r_a}^{r} E\mathrm{d}r \qquad (4-1)$$

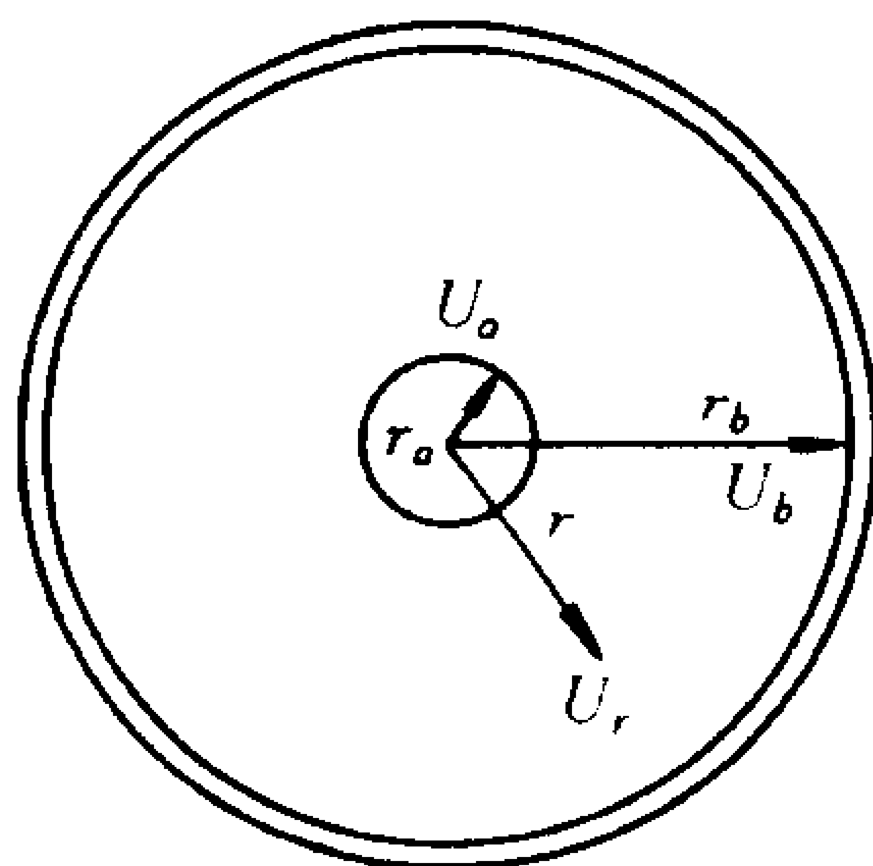


图4－2

又根据高斯定理,电荷均匀分布的无限长圆柱体的场强大小为

$$E = \frac{c}{r} \quad (\text{当 } r_a < r < r_b \text{ 时}) \tag{4-2}$$

式中 C 由圆柱体上线电荷密度决定. 由以上二式可得

$$U_r = U_a - \int_{r_a}^{r} E\mathrm{d}r = U_a - c\ln\left(\frac{r}{r_a}\right) \tag{4-3}$$

由于 $r = r_b$ 处, $U_r = U_b$, 即

$$U_b = U_a - c\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)$$

则

$$c = \frac{U_a - U_b}{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \tag{4-4}$$

将式(4-4)代入式(4-3),并取 $U_a = U_0$, $U_b = 0$,整理后得

$$U_r = U_0 \frac{\ln\left(\frac{r_b}{r}\right)}{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \tag{4-5}$$

或写成

$$\ln r = \ln r_b - \frac{U_r}{U_0}\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right) \tag{4-6}$$

实验时可将在稳恒电流场的测量值与上式的计算值进行比较.

3. 稳恒电流场及其等电势线的探测

用导电纸(或表面导电玻璃)为导电介质,在其上用特定形状的电极压紧(或用导电胶涂成电极),在电极上加稳定直流电压,则电极间的导电介质中就形成稳恒电流场.

对导电介质要求薄和均匀,电极和导电介质的接触电阻远小于导电介质的导电电阻.

电极的形状根据模拟的问题来定,图 4-3 为模拟二同轴带电圆柱体间静电场用的电极.

寻找等势线的最简单的办法是用电压计测量,即测出对同一电极电压相等之点. 但是电压计中要流过微小电流,它给探测引

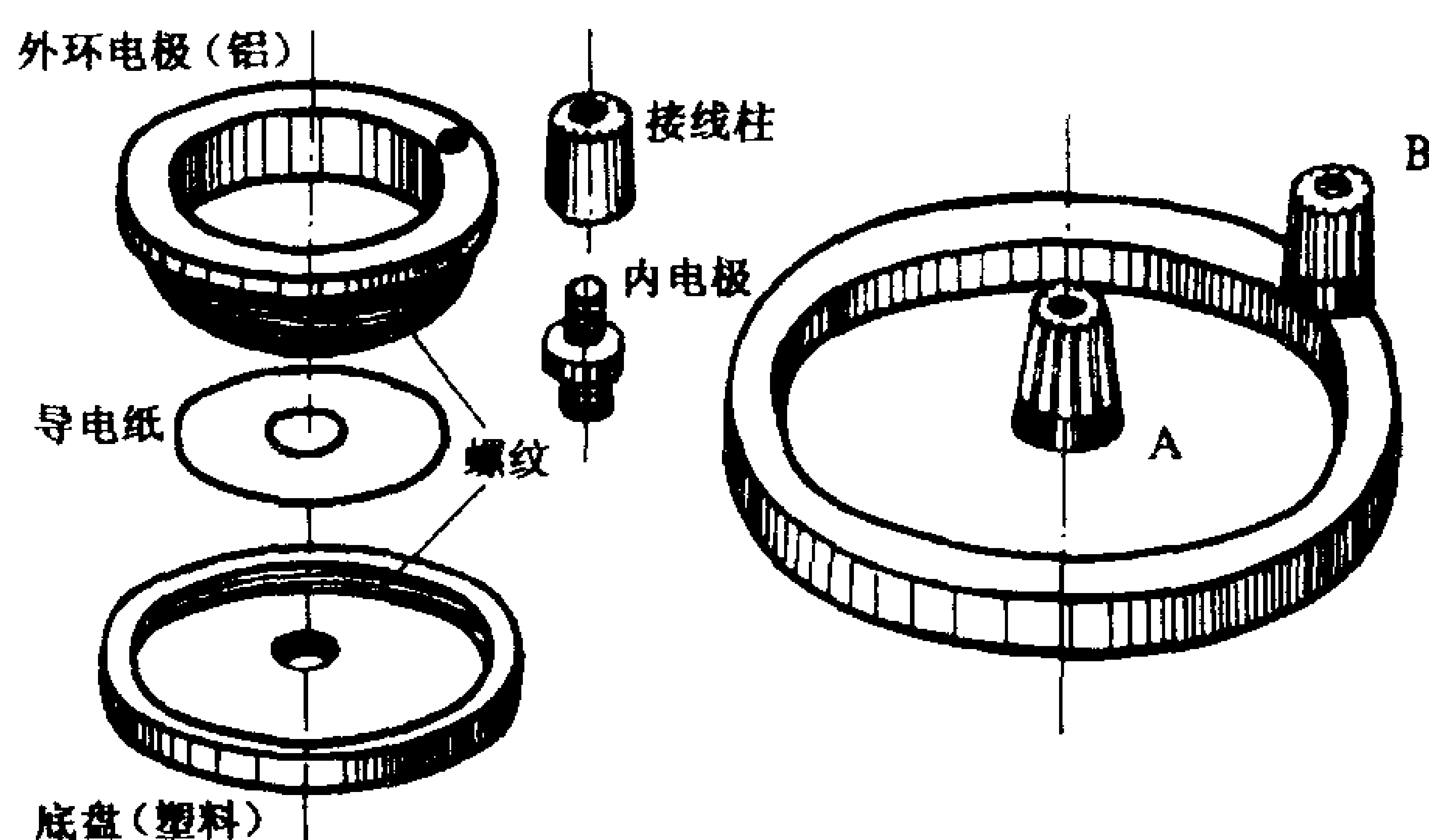


图 4－3

入误差，使用图 4－4 的补偿法电路，可以排除上述误差.

图中 G 为检流计，V 为电压计，C 为探针，A 为接收电极，E 为补偿电源，R 为分压器. 当探索电势为 U_0 的等势线时，悬空 C 端，调分压器 R 使电压计示值等于 U_0. 先用万用表找到 U_0 电势线的大概位置，再用探针 C 去找，当 G 的指针不动时，则该点电势为 U_0，移动 C 继续寻找.

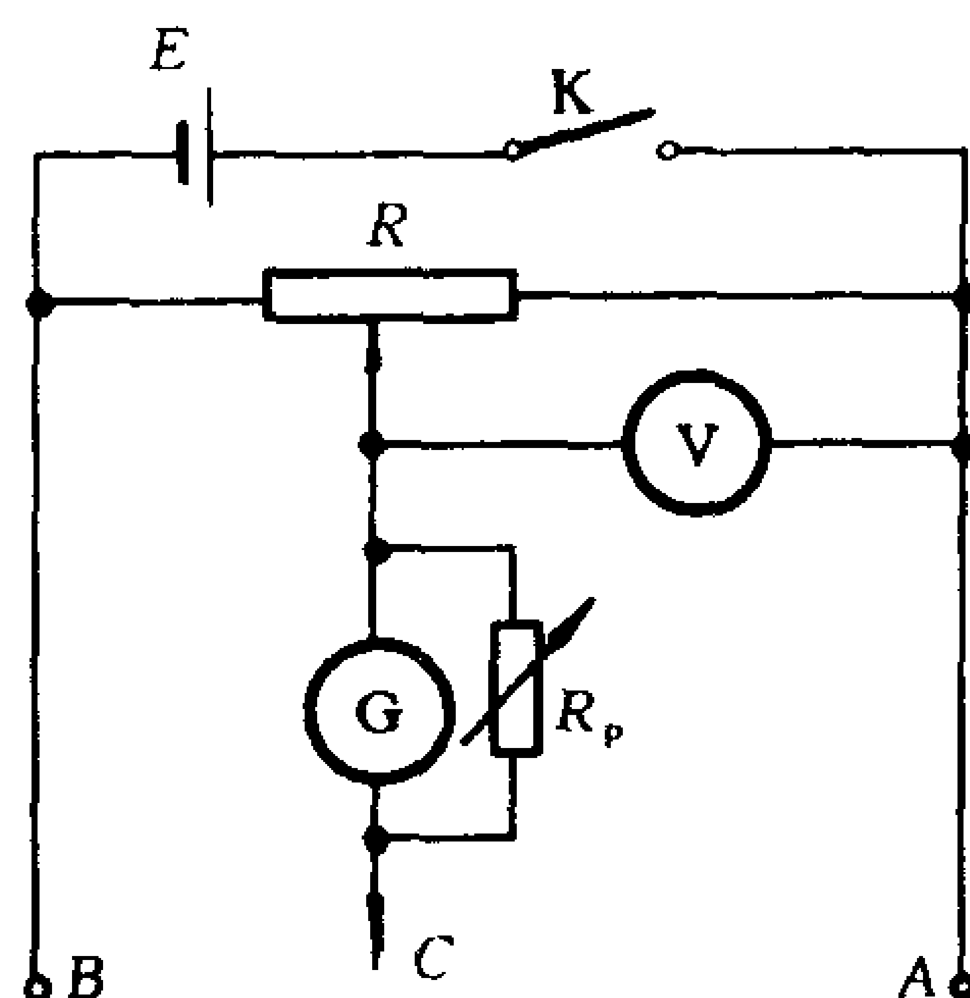


图 4－4

这种补偿电路使用电压计显示被测点的电压，而电压计中的电流又不需要由导电纸供给，因而减少了误差.

调 R_p 可以改变检流计的灵敏度（开始 R_p 取大值，细调时变小）.

4. 记录装置

实验时要用一专门设备记录每一条等势线上探测点的位置，记录装置有多种，在此介绍几种.

(1) 复印法

在导电纸下面垫上复写纸,记录时只要将表棒在测量点的位置向下重按一下,于是,测量点就被印到它下面的记录坐标纸上,同时由于复写纸能双面复印,因此在导电纸呈灰白色的反面也留下了该点的痕迹.

(2) 等臂记录法

如图 4-5 所示,C 是与横臂绝缘的探测棒,D 是记录棒,它们的横臂是一块较薄的弹簧片,各有一端与支架相连,另一端可以上

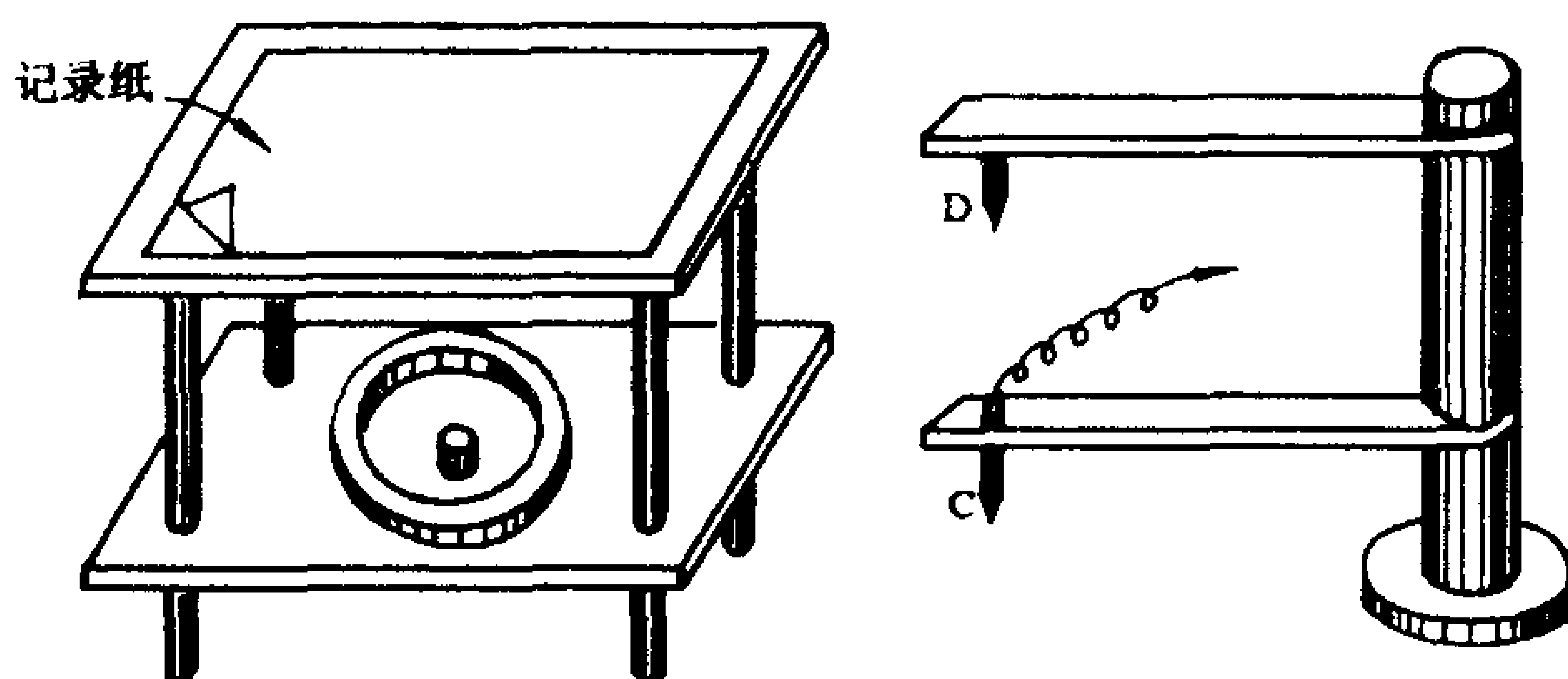


图 4-5 等臂记录法描绘电场的实验装置

下扳动,当下压探棒时,探棒即与导电纸接触可测量电势. 当找到等势点后,按下记录棒进行记录.

(3) 火花记录法

火花记录法的原理如图 4-6 所示. 图中 K_k 和 K_p 是按钮开关里的常开和常闭触点,按钮未下按时,电压表接在测量回路里,下按时,K_p 断,K_k 接通,变压器输出的 270 V 交流电压全部加在导电纸的 C、D 之间. 如果探棒垂直于导电纸面上提时,那么在刚断之际,交流电压全部集中到 C 点接触电阻上,于是,在探棒尖端和导电纸之间非常小的空气间隙发生跳火,结果在导电纸上留下焦斑. 它在导电纸的灰白面显得很清楚,可作为测量的记录点.

使用火花记录法,记录点不能太多,分布尽可能均匀些.

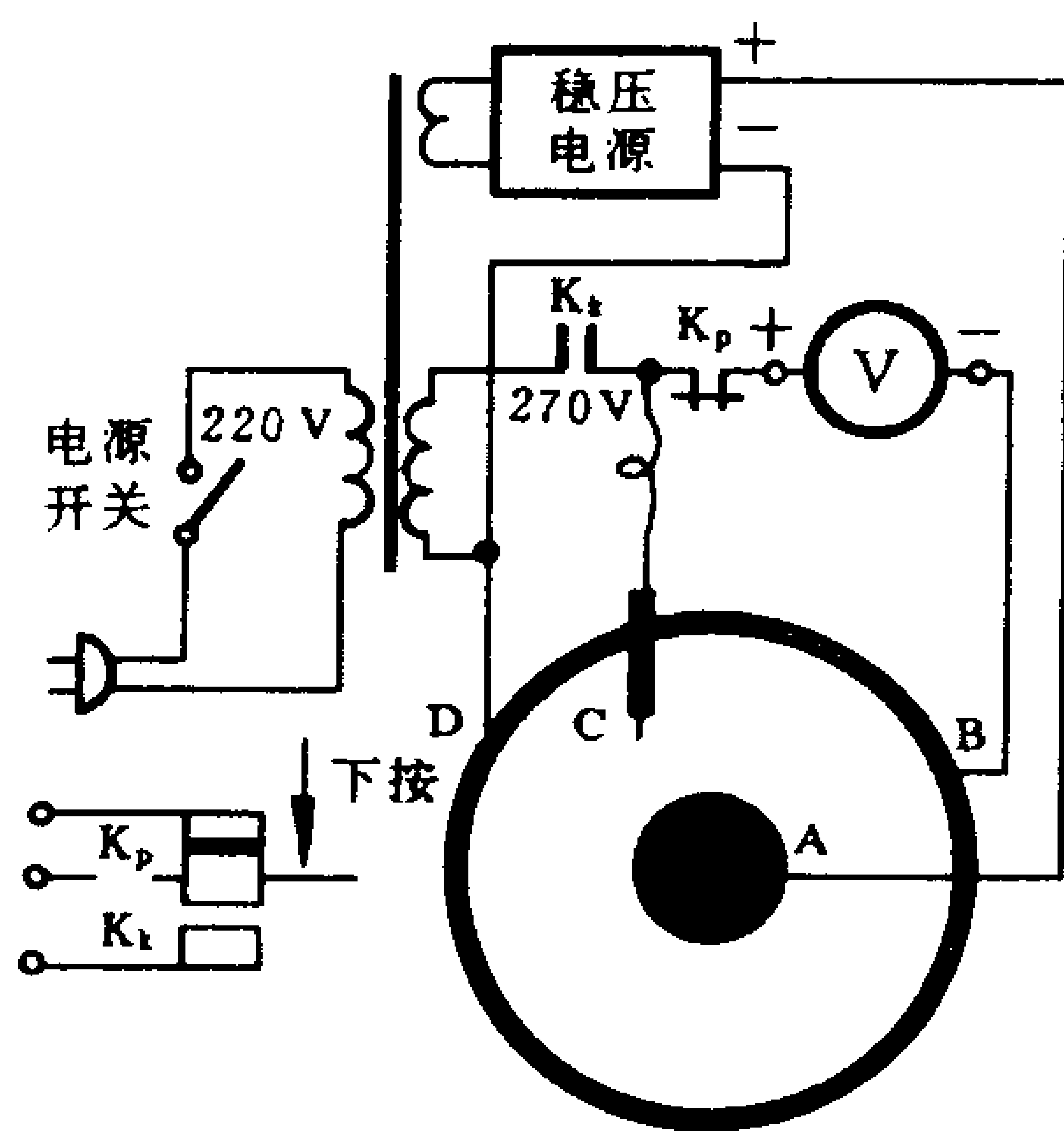


图 4－6　火花记录法原理

(4) 放大尺记录法

如图 4－7 所示,用 1:1 放大尺,将 C 点位置平移到 D 点去记录,在 D 针的下侧是复写纸和记录纸.

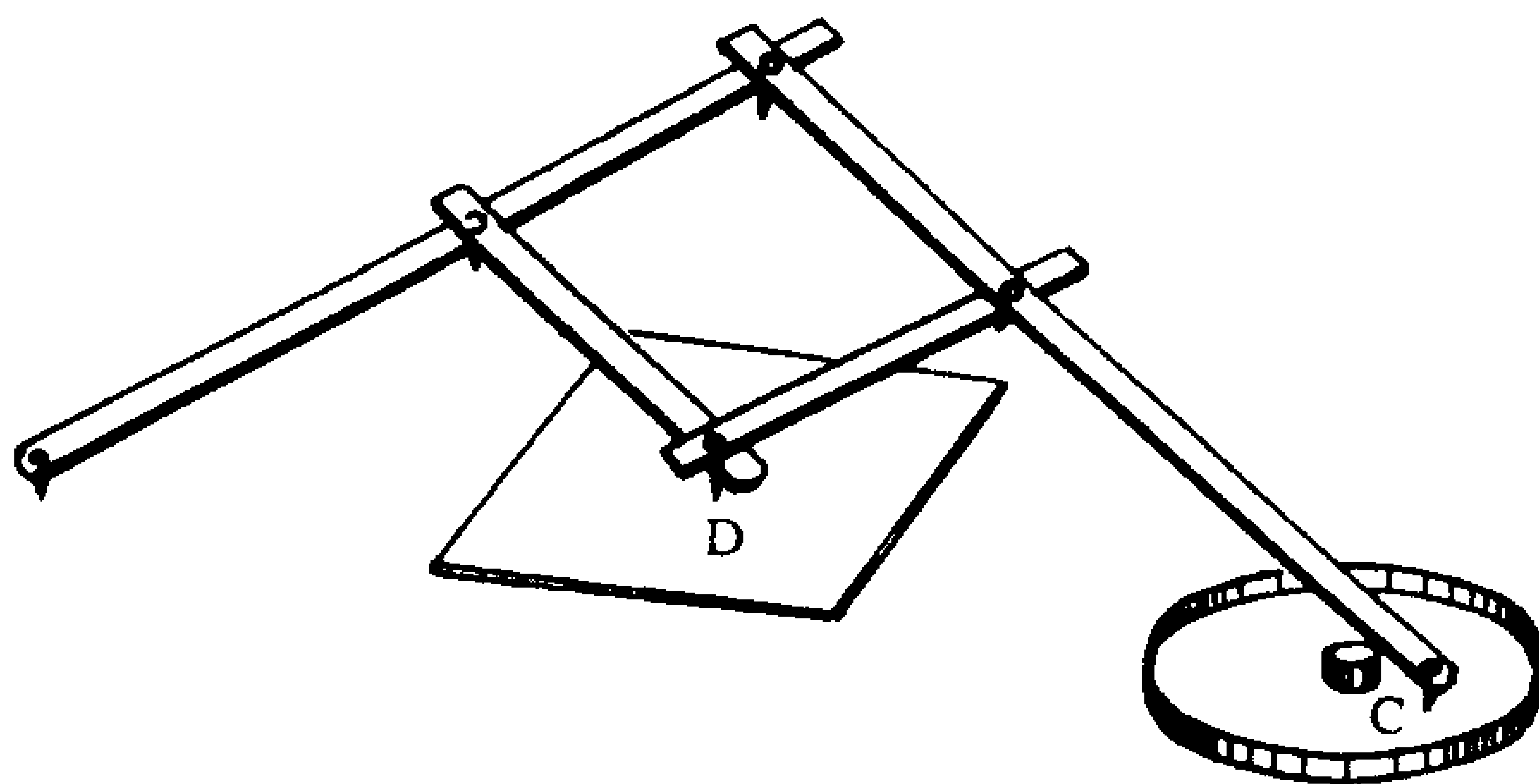


图 4－7

实验内容

1. 圆柱形电容器中等势线分布的模拟测绘

参照图 4－3 和 4－4 连接电路,A、B 端接到导电纸中心的圆

柱形电极和外侧的圆环形电极上．用实验室准备的记录装置记录等电势(1 V,2 V,…)点．

要求描绘七条不同电势的等势线，每条等势线应有五个以上的等电势点连接而成，连成的等势线不要忘记标明它的电势值．

圆柱形电容器中的等势线，在理想情况下是以轴线为中心的同心圆，但由于电极与导电纸间存在接触电阻，使圆心和半径都有可能偏离真正值．因此只能找出实验得到的圆心和半径．方法如下：首先根据等势线的分布利用目测定出一个“最佳”(即主观认为合适)的圆心位置．然后求出各圆的半径平均值，即将该圆的测量点与目测圆心连起来，量测长度求得平均值 $\bar{r}$．

以 $x(=U_r/U_0)$ 为横坐标，$y(=\ln\bar{r})$ 为纵坐标作图，如果得到的是一条直线，就验证了柱形电容器中 $E=\frac{c}{r}$ 的关系式，并根据直线的截距和斜率分别算出 B 和 A 的半径，试将其结果与用游标尺直接测量的数值进行比较，以判断本实验的准确程度．

2．两根无限长平行直导线周围等势线分布的模拟测绘

选用相应的电极，运用上述相同的方法作七条等势线，不要求对测量结果作定量的计算和验证．但要注意等势线分布的规律，试解释其物理意义．

预习思考题

1．金属圆环 B 和圆柱 A 为何要与导电纸良好接触？

2．记录测量点有几种常用方法？试比较一下．

3．火花记录点是否可非常多？为什么？

4．怎样求等势线的平均半径值？

5．根据 $\ln\bar{r}-U_r/U_0$ 直线的截距和斜率，怎样算出 A 和 B 的半径？

复习思考题

1．在圆柱电容器中，$y(=\ln\bar{r})$ 和 $x(=U_r/U_0)$ 是直线关系为什么验证

了 $E=\frac{c}{r}$ 的成立?

2. 圆柱形电容器和球形电容器中场强和电势的分布是否相同? 能否用导电纸来模拟球形电容器中的电势分布?

3. 如果在描绘圆柱形电容器的等势线时，所用的电压表为 1.5 级 $\left(即\frac{\Delta U}{U_m}=0.015, U_m 为量程电压值\right)$，若 ΔR_A 和 ΔR_B 很小，可以略去，求：各种电势等势线的半径相对不确定度.

实验五　用惠斯通电桥测电阻

目的

1. 掌握惠斯通电桥测电阻的原理；
2. 学会正确使用箱式电桥测电阻的方法；
3. 了解提高电桥灵敏度的几种途径.

仪器和用具

万用电表、滑线变阻器、电阻箱(3 个)、检流计、直流电源、待测电阻(阻值差异较大的 3 个)、箱式电桥、开关和导线.

原理

"电桥"是很重要的电磁学基本测量仪器之一. 它主要用来测量电阻器的阻值、线圈的电感量和电容器的电容及其损耗.

为了适应不同的测量目的,设计了多种不同功能的电桥. 最简单的是单臂电桥,即惠斯通电桥,用来精确测量中等阻值(几十欧姆至几十万欧姆)的电阻. 此外还有测量低阻值(几欧姆以下)的双臂电桥,即开尔文双电桥;测量线圈电感量的电感电桥;测量电容器电容量的电容电桥;还有既能测量电感又能测量电容及其损耗的交流电桥等. 尽管各种电桥测量的对象不同、构造各异,但基本原理和思想方法大致相同. 因此,学习掌握惠斯通电桥的原理不仅能为正确使用单臂电桥,而且也为分析其他电桥的原理和使用方法奠定了基础.

惠斯通电桥的原理如图 5－1 所示. 图中 ab、bc、cd 和 da 四条支路分别由电阻 $R_1(R_x)$、R_2、R_3 和 R_4 组成,称为电桥的四条桥臂. 通常,桥臂 ab 接待测电阻 R_x,其余各臂电阻都是可调节的标准电阻[①]. 在 bd 两对角间连接检流计、开关和限流电阻 R_G. 在

---

① 由于电阻箱的准确度较高,因此用它作为标准电阻.

ac 两对角间连接电池、开关和限流电阻 R_E. 当接通电键 K_E 和 K_G 后，各支路中均有电流流通，检流计支路起了沟通 abc 和 adc 两条支路的作用，可直接比较 bd 两点的电势，电桥之名由此而来. 适当调整各臂的电阻值，可以使流过检流计的电流为零，即 $I_G=0$. 这时，称电桥达到了平衡. 平衡时 b、d 两点的电势相等. 根据分压器原理可知

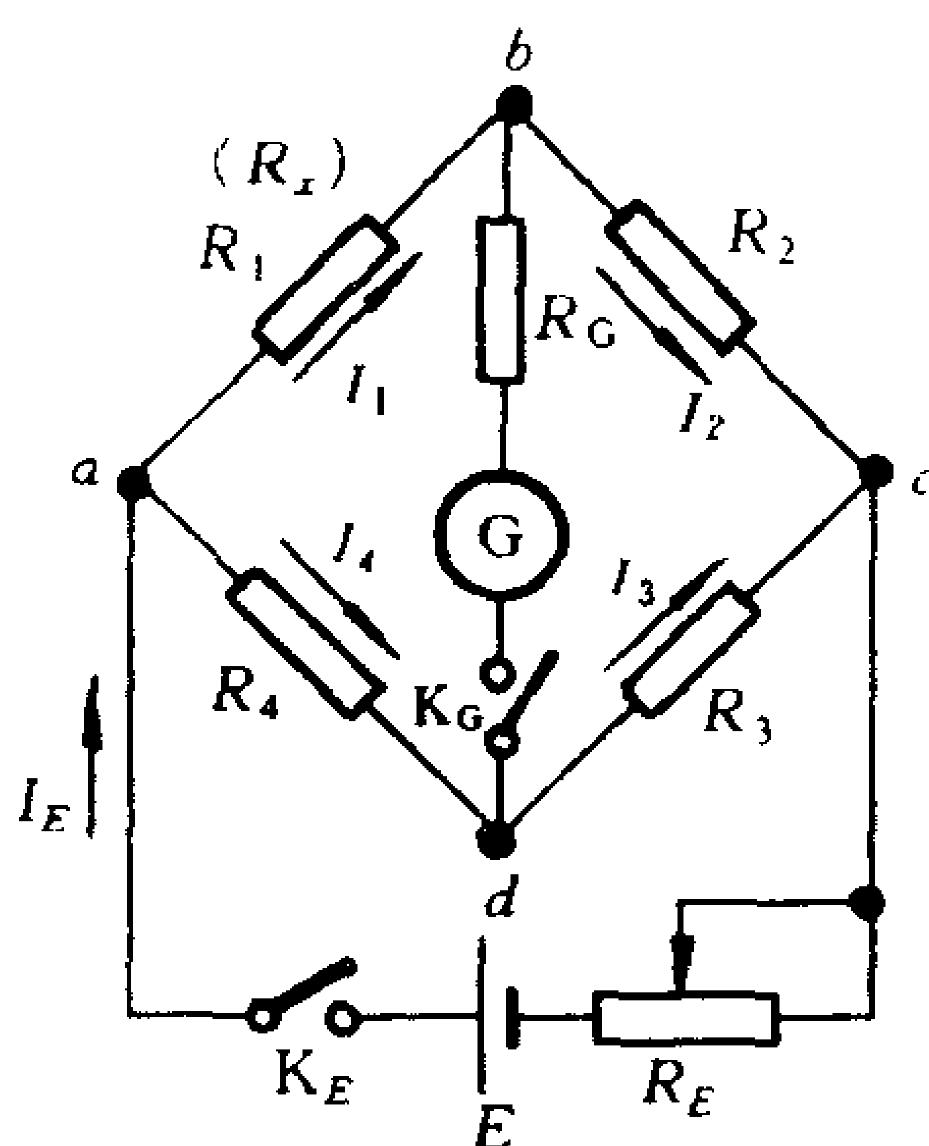


图 5-1 惠斯通电桥原理图

$$U_{bc}=U_{ac}\frac{R_2}{R_1+R_2} \quad (5-1)$$

$$U_{dc}=U_{ac}\frac{R_3}{R_3+R_4} \quad (5-2)$$

平衡时，$U_{bc}=U_{dc}$ 即 $\dfrac{R_2}{R_1+R_2}=\dfrac{R_3}{R_3+R_4}$

整理化简后得到

$$R_1=\frac{R_2}{R_3}R_4=R_x \quad (5-3)$$

由(5-3)式可知：待测电阻 R_x 等于 R_2/R_3 与 R_4 的乘积. 通常，称 R_2、R_3 为比例臂，与此相应的 R_4 为比较臂. 所以电桥由四臂(测量臂、比较臂和比例臂)、检流计和电源三部分组成. 与检流计串联的限流电阻 R_G 和开关 K_G 都是为在调节电桥平衡时保护检流计，不使其在长时间内有较大电流通过而设置的.

在用天平称质量时已知，测得质量的精密度主要决定于天平的灵敏度，与此相似，使用电桥测量电阻时的精密度也主要取决于电桥的灵敏度. 当电桥平衡时，若使比较臂 R_4，改变一微小量 δR_4，电桥将偏离平衡，检流计偏转 n 个格，则常用如下的相对灵敏度 S 表示电桥灵敏度

$$S = \frac{n}{\frac{\delta R_4}{R_4}} \qquad (5-4)$$

由上式可知，如果检流计的可分辨偏转量为Δn（取0.2～0.5格），则由电桥灵敏度引入被测量的相对误差为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta n}{S} \qquad (5-5)$$

即电桥的灵敏度越高（S越大），由灵敏度引入的误差越小.

实验和理论都已证明，电桥的灵敏度与下面诸因素有关：

1. 与检流计的电流灵敏度S_i成正比. 但是S_i值大，电桥就不易稳定，平衡调节比较困难；S_i值小，测量精确度低. 因此选用适当灵敏度的电流计是很重要的.

2. 与电源的电动势E成正比.

3. 与电源的内阻r_E和串联的限流电阻R_E有关. 增加R_E可以降低电桥的灵敏度，这对寻找电桥调平衡的规律较为有利. 随着平衡逐渐趋近，R_E值应适当减到最小值.

4. 与检流计和电源所接的位置有关. 当$R_G > r_E + R_E$，又$R_1 > R_3$、$R_2 > R_4$或者$R_1 < R_3$、$R_2 < R_4$，那么检流计接在bd两点比接在ac两点时的电桥灵敏度来得高. 当$R_G < r_E + R_E$时，满足$R_1 > R_3$、$R_2 < R_4$或者$R_1 < R_3$、$R_2 > R_4$的条件，那么与上述接法相反的桥路，灵敏度可更高些①.

5. 与检流计的内阻有关. R_G越小，电桥的灵敏度S_b越高，反之则低.

实验内容

1. 用电阻箱、检流计组成惠斯通电桥测量电阻

参照图5－1用三个电阻箱和检流计组成一电桥. 测量时，先

① 参阅，物理实验，1981(3)：104.

用万用电表测一下阻值(粗测). 用电桥进行测量时,为便于调节应先将电阻 R_G 和 R_E 取最大值. 比例臂 R_2 和 R_3 不宜取得很小,可取 $R_2=R_3=500\ \Omega$.

联接待测电阻 R_x,取 R_4 等于 R_x 粗测值,按电键 K_E 和 K_G,观察检流计指针偏转方向和大小,改变 R_4 再观察,根据观察的情况正确调整 R_4,直至检流计指针无偏转. 逐渐减小 R_G 及 R_E 值再调 R_4. 其次,将 R_2 和 R_3 交换后再测(换臂测量).

当 R_x 大于 R_4 的最大值时,则取 $\frac{R_2}{R_3}=10$ 或 100 去测量,当测得的 R_4 的有效位数不足时,可以取 $\frac{R_2}{R_3}=0.1$ 或 0.01.

测量三个待测电阻的阻值,并估计其不确定度.

2. 测量电桥的相对灵敏度

参照式(5-4)拟定测量步骤.

3. 参照下列要求进行探索并记录结果:

(1) R_G 和 R_E 取最小和最大时的差别.

(2) R_2、R_3 取 5 000 Ω 或 50 Ω 时的情况.

(3) 对调检流计和电源的位置时的情况.

4. 使用箱式电桥测量

测量标称值相同的商品电阻的阻值,数量不少于 15 个,求出其平均值及标准偏差,检查是否有废品.

预习思考题

1. 桥路平衡的条件是什么?

2. 中学实验里用滑线电桥测量待测电阻值,它平衡的条件是什么? 滑块在什么位置时,测量精度最高? 为什么?

3. 为什么用电桥测量待测电阻前,先要用万用表进行粗测?

4. 箱式电桥中比例臂的倍率值选取的原则是什么?

5. 为什么要测量电桥的灵敏度?

复习思考题

1. 根据电阻箱组装电桥的测试结果，说明电桥灵敏度与哪些因素有关？

2. 怎样消除比例臂两只电阻不准确相等所造成的系统误差？

3. 改变电源极性对结果有什么影响？为什么箱式电桥没有这样的附加装置？

4. 可否用电桥来测量电流表（微安计、毫安计、安培计）的内阻？测量的精度主要取决于什么？为什么？

5. 电桥的灵敏度是否越高越好？为什么？

测量举例

用电阻箱自组电桥测 R

测量时，R_2、R_3 用 ZX36 电阻箱，R_4 为 ZX21 电阻箱，检流计常量 $<1\times10^{-8}$ A/div，待测电阻 $R_x\simeq40\ \Omega$. 下表中的数据取了五种 R_3、R_2 和 R_4 组测量，测量的后一半为换臂后测量的.

R_3/Ω	1 000	2 000	3 000	1 500	2 500	1 000	2 000	3 000	1 500	2 500
R_2/Ω	100	200	300	150	250	100	200	300	150	250
R_4/Ω	385.5	383.2	384.5	384.9	384.4	383.0	384.1	383.9	384.0	383.6

$$R_x=38.411\ \Omega,\quad s(R)=0.024\ \Omega$$

相对灵敏度 S 的测量：

$R_4=1\,078\ \Omega$，检流计示值为"0"，$R_4=1\,079\ \Omega$ 时，示值为 0.8 div

$$S=0.8/(1/1\,078)=860\ \text{div}$$

不确定度计算：不确定度主要来源于(1)电阻箱的误差，(2)电桥灵敏度误差，(3)多次测量的差异.

按所用电阻箱的标准，R_2、R_3 电阻箱 ×100，×1 000 档为 0.1 级，R_4 电阻箱 ×100 档为 0.5 级，其标准不确定度（计算时取 $R_2=200\ \Omega$，$R_3=2\,000\ \Omega$，$R_4=380\ \Omega$）为

$u_B(R_2)=0.1\%\times 200\ \Omega/\sqrt{3}=0.12\ \Omega$, $u_B(R_3)=0.1\%\times 2\,000\ \Omega/\sqrt{3}=1.15\ \Omega$, $u_B(R_4)=0.5\%\times 380\ \Omega/\sqrt{3}=1.1\ \Omega$

电阻箱引入合成标准不确定度

$$u_c(R)=38.4\sqrt{\left(\frac{0.12}{200}\right)^2+\left(\frac{1.15}{2\,000}\right)^2+\left(\frac{1.1}{380}\right)^2}\ \Omega=0.12\ \Omega$$

电桥灵敏度引入不确定度

$u_B(R)=(0.2/860)\times 38.4\ \Omega/\sqrt{3}=0.005\ \Omega$

重复测量得出标准不确定 $u_A(R)=s(\overline{R})=0.024\ \Omega$

合成标准不确定度 $u_c(R)=\sqrt{0.12^2+0.005^2+0.024^2}\ \Omega=0.12\ \Omega$

结果　　$R=(38.41\pm 0.12)\ \Omega$

[附记]

QJ－23 型箱式电桥的说明

[1] 电桥臂上电阻的组成

QJ－23 型电桥是目前应用最广的一种商品电桥，它的原理如图 5－2 所示．其中 R_2 和 R_3 作为比例臂，R_4 为比较臂，改变 c 点的位置就可以改变 R_2/R_3 的比值．当选择开关 c 与“10^{-1}”位置相连时，便有

$$\frac{R_2}{R_3}=\frac{0.999+8.902+81.009}{409.09\times 2+81.009+8.902+0.999}=0.100\,00$$

若取 $\frac{R_2}{R_3}=0.100\,00$ 时，则 R_2/R_3 的准确度可达万分之几，与 c 在“10”位置几乎相同，然而 R_4 的准确度较 R_2/R_3 低一个量级，所以此时 R_x 的系统误差主要取决于 R_4，而不是 R_2/R_3．由图可知比较臂有四只可变的标准电阻器相互串联，它们组成了 R_4，其阻值分别为：9×1 Ω、9×10 Ω、9×100 Ω 和 9×1 000 Ω，总阻值可达 999 9 Ω．

[2]本仪器适用于测量1～9 999 000 Ω范围内的电阻，基本

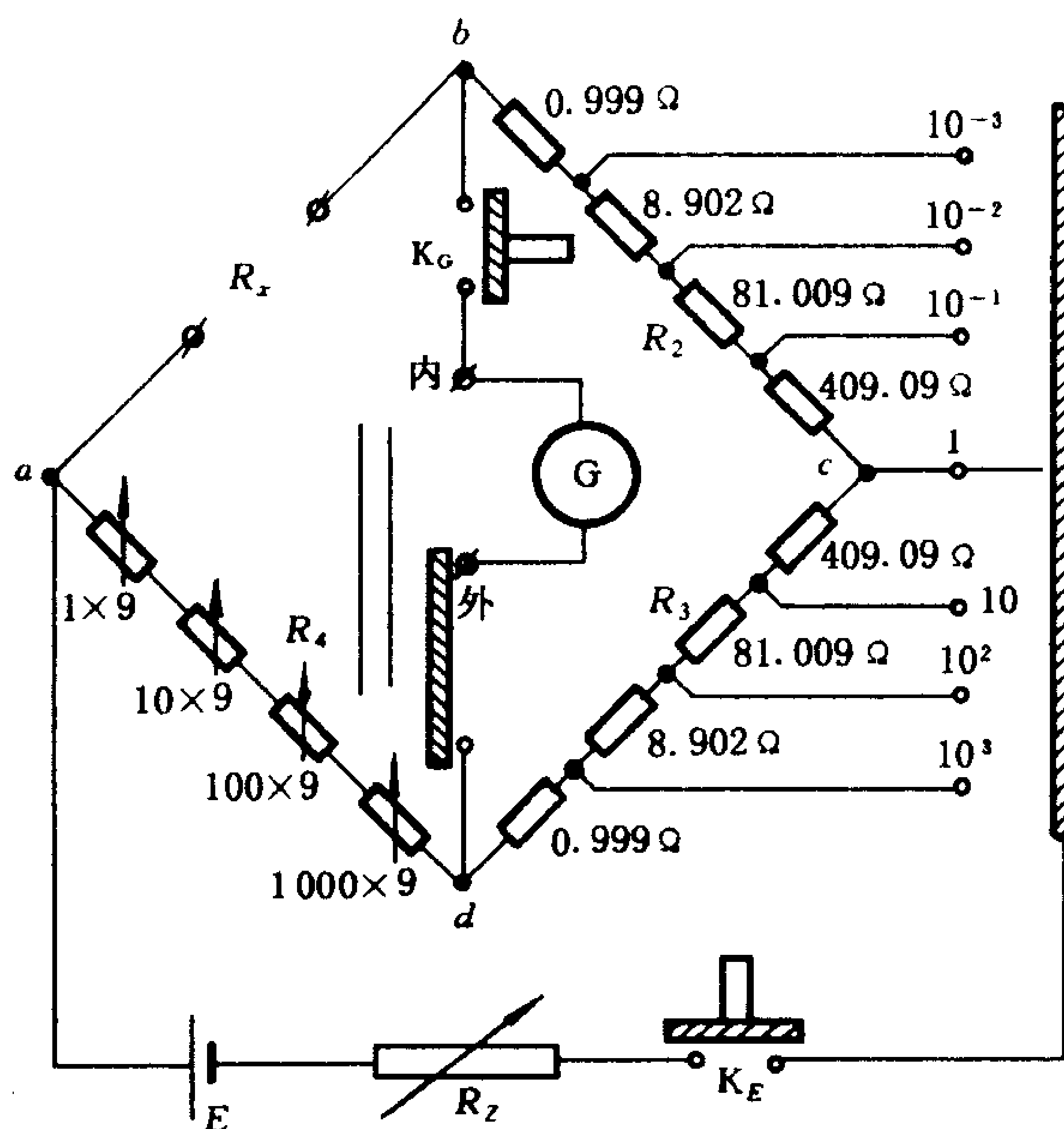


图 5-2 QJ-23 型电桥原理图

量程为 100～99 990 Ω,其准确度见表 5-1 所示.

表 5-1

倍率	测量范围	准确度	电源电压/V
$\times 10^{-3}$	1～9.999 Ω	±1%	4.5
$\times 10^{-2}$	10～99.99 Ω	±0.5%	
$\times 10^{-1}$	10^2～999.9 Ω	±0.2%	
×1	10^3～9 999 Ω	±0.2%	6
×10	10^4～4×10^4 Ω	±0.2%	15
	5×10^4～99 990 Ω①	±0.2%	
$\times 10^2$	10^5～999 900 Ω②	±0.5%	
$\times 10^3$	10^6～9 999 000 Ω③	±1%	

①②③ 在测量 50 kΩ 以上的电阻时,要外接高灵敏度电流计.

[3]本仪器内附的检流计,电流计常量小于6×10^{-7} A·mm^{-1},c 点连接位置不同所对应的R_2/R_3 比值如下表所列:

c 点位置	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3
R_2/R_3	0.001 000	0.010 000	0.100 00	1.000 0	10.000	100.00	1 000

周期小于4 s. 内附4.5 V干电池(即1.5 V×3);

[4] 仪器面板元件安置如图5-3所示. 右上角四只读数盘就是R_4,右下角有接R_x的两个端钮和接通电源K_E、接通检流计K_G的两只按钮(如果需要长时间接通,可在按下后沿顺时针方向旋转,即可锁住),中上部分是比例臂选择开关,也称为倍率旋钮,它的下面就是检流计,左面由上往下分别是"+、-、内、G、外"五个接线端钮,"+、-"为外接电源的输入端钮,"内、G、外"为检流计选择端钮,当"G"和"内"由短路片连接时,则在"G"和"外"间需外接检流计,在"G"和"外"短接时,本仪器内附的检流计已接入桥路之中.

[5] 在一般正常情况下,比例臂放在"×1"档,比较臂放在1 000 Ω上,按下K_E然后短时间按K_G,这时将看到检流计指针在

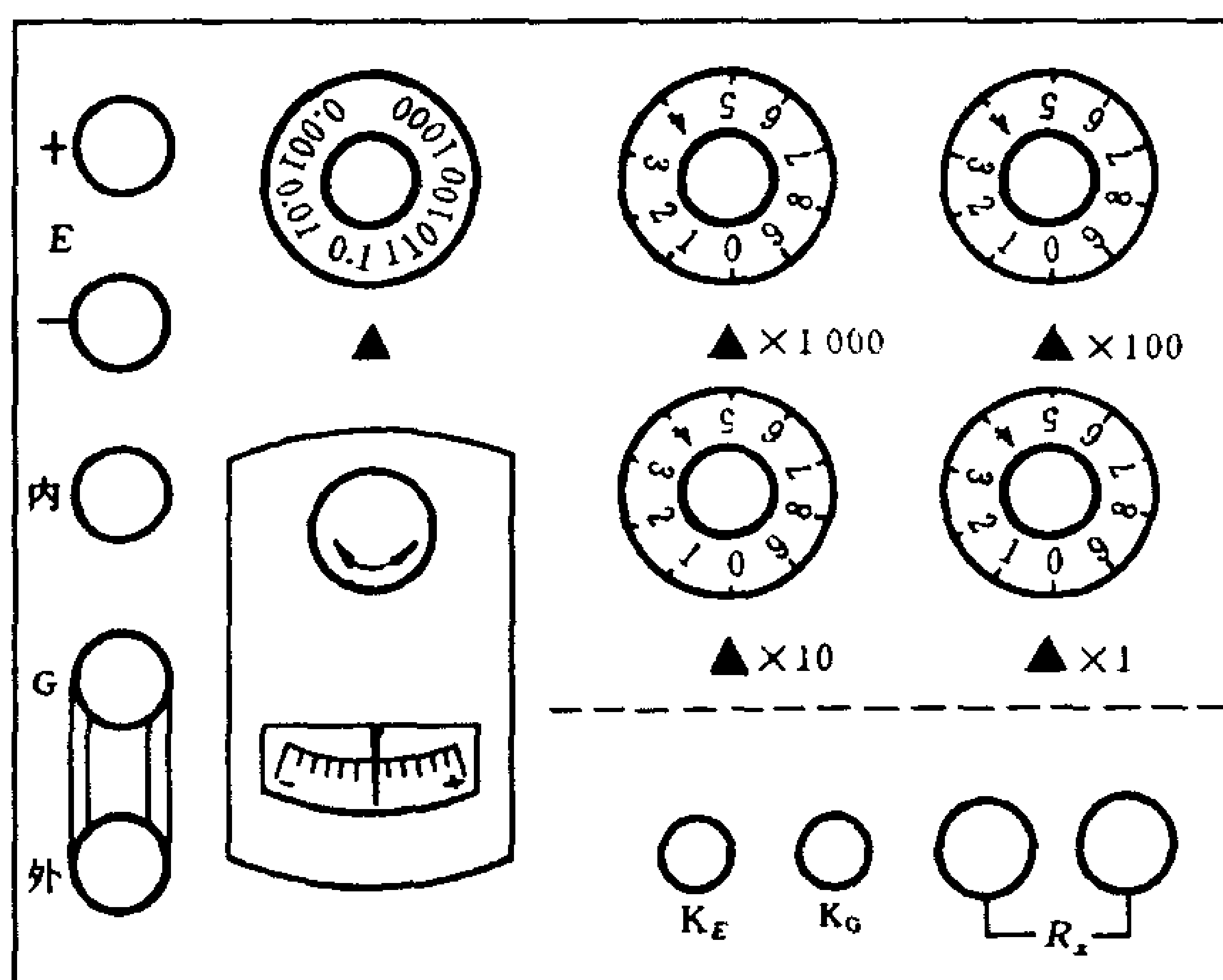


图5-3 QJ-23型电桥面板图

晃动,如果指针偏向"+"的一边,说明被测电阻大于1 000 Ω,可把比例臂放在"×10"档,再次按 K_E 和 K_G,如果指针仍偏向"+"的一边,可把比例臂放在"×100"档,如果指针开始向"-"方向偏,则可知待测电阻值已接近,然后调节四个比较臂的读数盘直到电桥平衡,根据计算可得到 R_x 的粗测值. 进一步细测可按下表所列数据选定合适的比例臂重新测量. 为了保证待测阻值较大时有一定的准确度和灵敏度,在检流计不更换的条件下可适当提高电源电压.

[6] 测量电感性电阻时,应先按 K_E 再接 K_G,断开时先放开 K_G 再放开 K_E.

[7] 电桥使用完毕应取出电池,开放按钮,短路检流计.

实验六　半导体热敏电阻特性的研究

目的

1. 研究热敏电阻的温度特性；
2. 掌握非平衡电桥的原理；
3. 了解半导体温度计的结构及使用方法.

仪器和用具

直流稳压电源、电阻箱、检流计、热敏电阻①、温度计、滑线电阻、恒温器或杜瓦瓶、加热器、微安表等.

原理

热敏电阻是阻值对温度变化非常敏感的一种半导体电阻，它具有许多独特的优点，如能测出温度的微小变化、能长期工作、体积小、结构简单等. 它在自动化、遥控、无线电技术、测温技术等方面都有广泛的应用.

热敏电阻的基本特性是温度特性. 在半导体中原子核对价电子的约束力要比金属中的大，因而自由载流子数较少，故半导体的电阻率较高而金属的电阻率很低，由于半导体中的载流子数目是随着温度升高而按指数激烈地增加，载流子的数目越多，导电能力越强、电阻率就越小，因此热敏电阻随着温度升高，它的电阻率将按指数规律迅速地减小. 这和金属中自由电子导电恰好相反，金属的电阻率是随温度上升而缓慢地增大的. 图 6－1 是热敏电阻值和金属铂电阻随温度而变化的特性曲线图.

由实验可知，当温度由 0 ℃变到 300 ℃时金属铂的电阻值总

---

① 可用 AD590 集成温度传感器.

共变化 1 倍；而一般的热敏电阻值变化可达 1 000 倍左右，所以半导体的电阻温度系数远远大于金属.

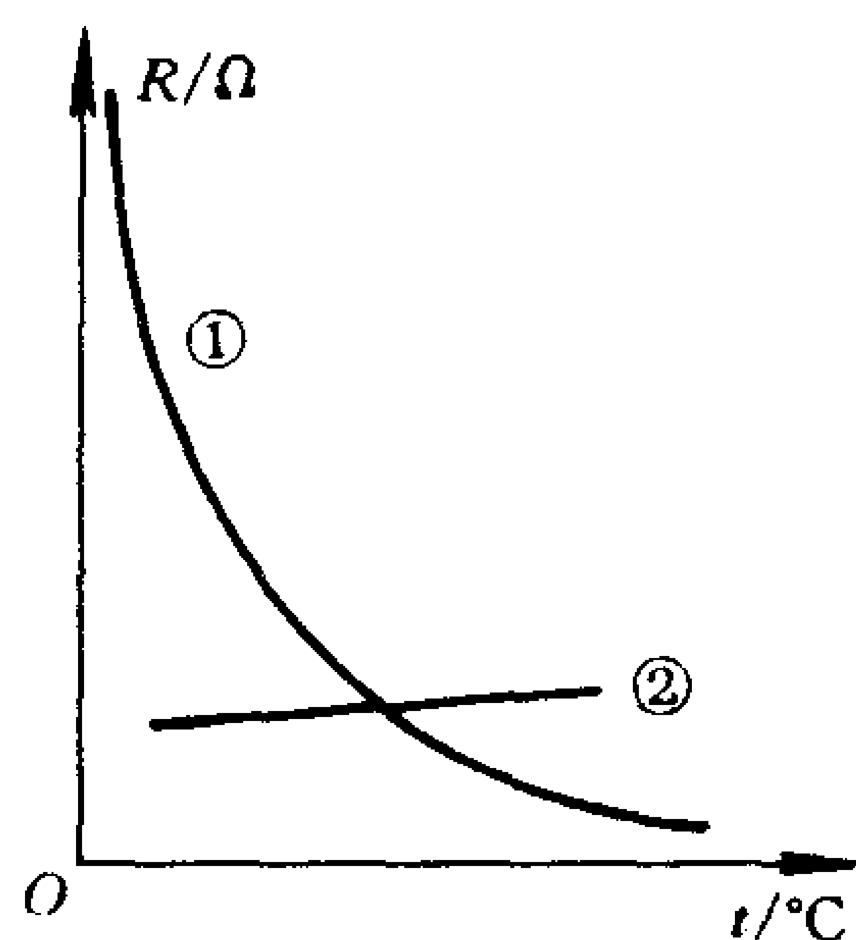


图 6-1　热敏电阻①和铂金属②的电阻特性曲线

实验表明，在一定的温度范围内，半导体的电阻率 ρ 和热力学温度 T 之间的关系可用下式表示：

$$\rho = a_0 e^{b/T} \tag{6-1}$$

式中 a_0 和 b 为常量，其数值与材料的物理性质有关. 热敏电阻的阻值，根据电阻定律可写成

$$R_T = \rho \frac{l}{S} = a_0 e^{b/T} \frac{l}{S} = a e^{b/T} \tag{6-2}$$

式中 l 为电极间的距离，S 为热敏电阻的横截面积，$a = a_0 \frac{l}{S}$，常量 a、b 可用实验的方法求出.

将式(6-2)两侧取对数，得

$$\ln R_T = \ln a + b \frac{1}{T} \tag{6-3}$$

令 $x = \frac{1}{T}$，$y = \ln R_T$，$A = \ln a$，则式(6-3)写成

$$y = A + bx \tag{6-4}$$

式中 x、y 可由测量值 T、R_T 求出，利用 n 组测量值，可用图解法、计算法或最小二乘法求出参数 A、b 之值，又可由 A 求出 a 值. 注意温度 T 为热力学温度(K).

热敏电阻 R_T 在不同温度时的电阻值，可由惠斯通电桥测得，测量电路如图 6-2 所示. 图中 R_T 为热敏电阻，R_0、R_1、R_2 均为电阻箱，E 为直流电源，G 为检流计，当电桥平衡时

$$R_T = \frac{R_1}{R_2} R_0 \tag{6-5}$$

即可由 R_0 及比值 R_1/R_2 算出 R_T 之值.

调节 R_p 可以影响测量的精密度．当开始调平衡时 R_p 宜取得大些，随平衡要求的提高，可逐渐减少其值．当 R_p 减少时，电桥的灵敏度增加，测得的 R_0 的有效位数增多．

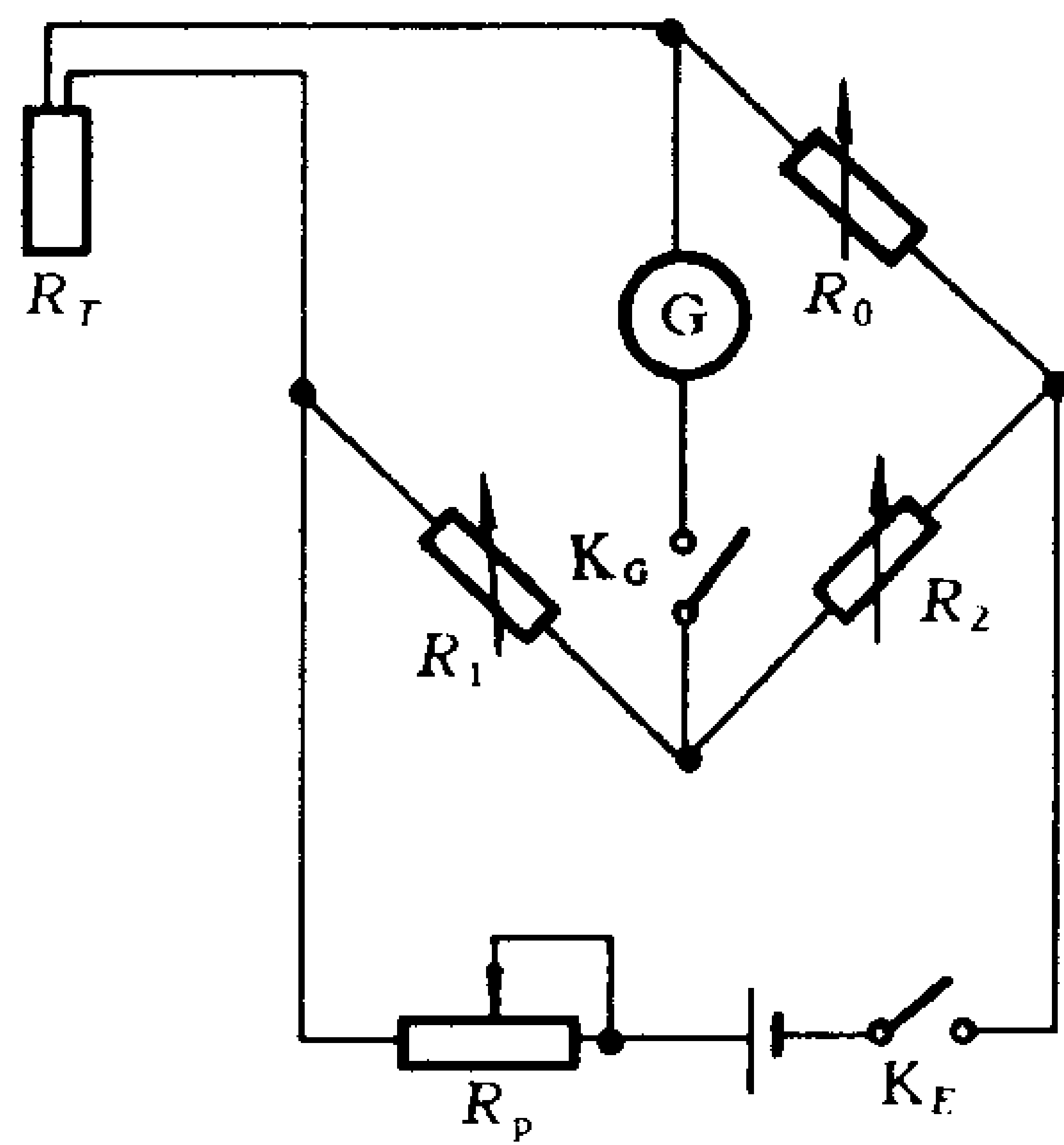


图 6－2　用电桥测电阻的原理图

当 R_T 在某一温度下，将电桥调平衡后，改变 R_T 所处的温度，R_T 的阻值发生变化，从而电桥失去平衡，这时检流计的示值将是 R_T 处温度增量的函数．如果测出检流计的示值与 R_T 温度的关系，就可利用此非平衡电桥去测量 R_T 处未知温度之值，此即热敏电阻温度计的原理．

图 6－3 为热敏电阻温度计原理图：E 为直流电源，K_1 为工作选择开关（N：调零；M：校正；P：测量），R_T 为热敏电阻，G为微安

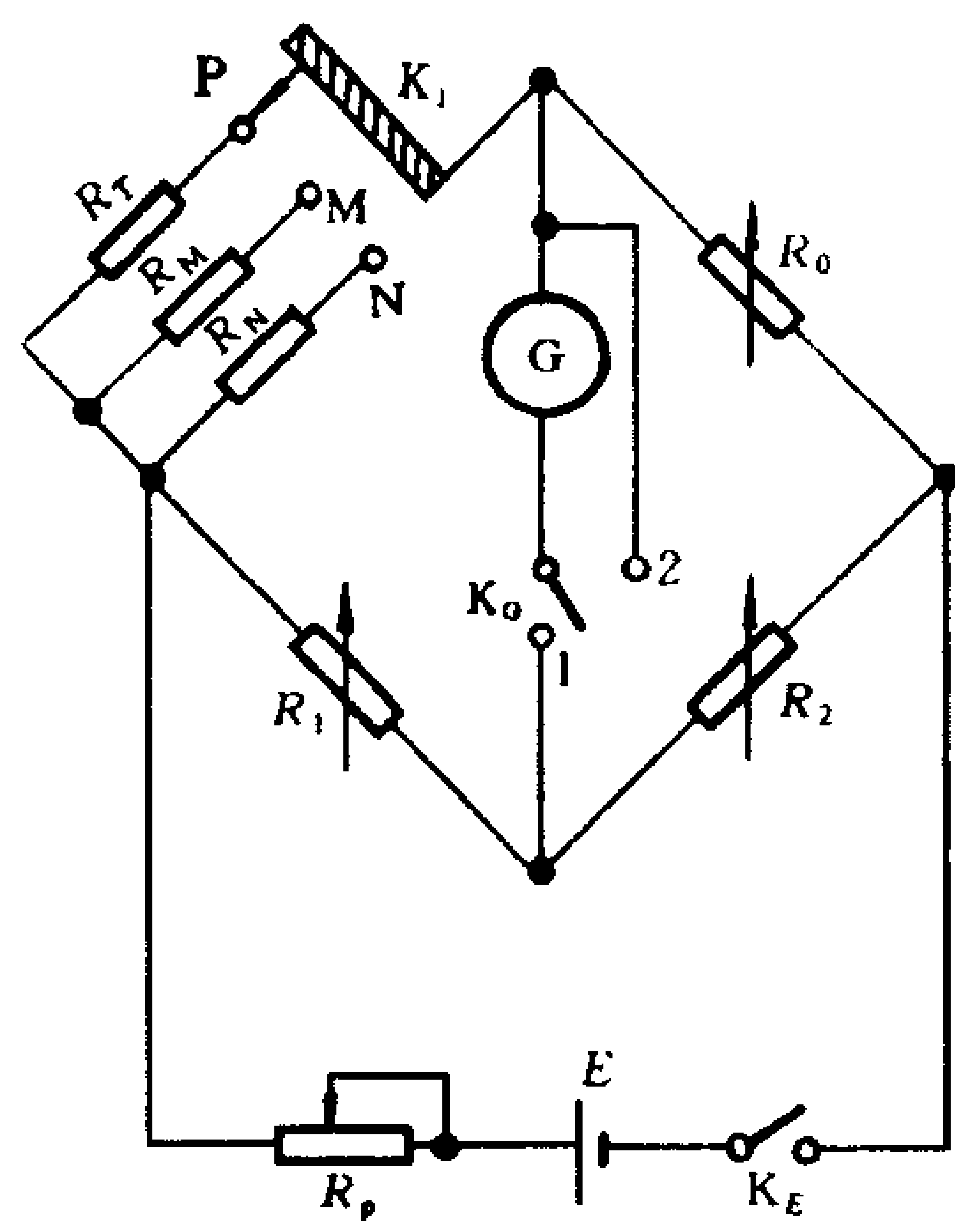


图 6－3　半导体温度计线路图

表，K_G 为电流计开关，K_E 为电源开关. 若此温度计的设计测温范围为 $t_1 \sim t_2$（单位为℃），则电阻 R_N 的阻值等于 R_T 在 t_1 时之值 $R_T(t_1)$，R_M 的阻值等于 R_T 在 t_2 时之值 $R_T(t_2)$. R_N、R_M 用于校正温度计.

实验内容

1. 热敏电阻温度特性的研究

将热敏电阻制成的探头和温度计捆在一起，插入加热瓶（图 6－4）中，瓶中水温可由电热器调节. 参照图 6－2 联成一"惠斯通电桥"电路.

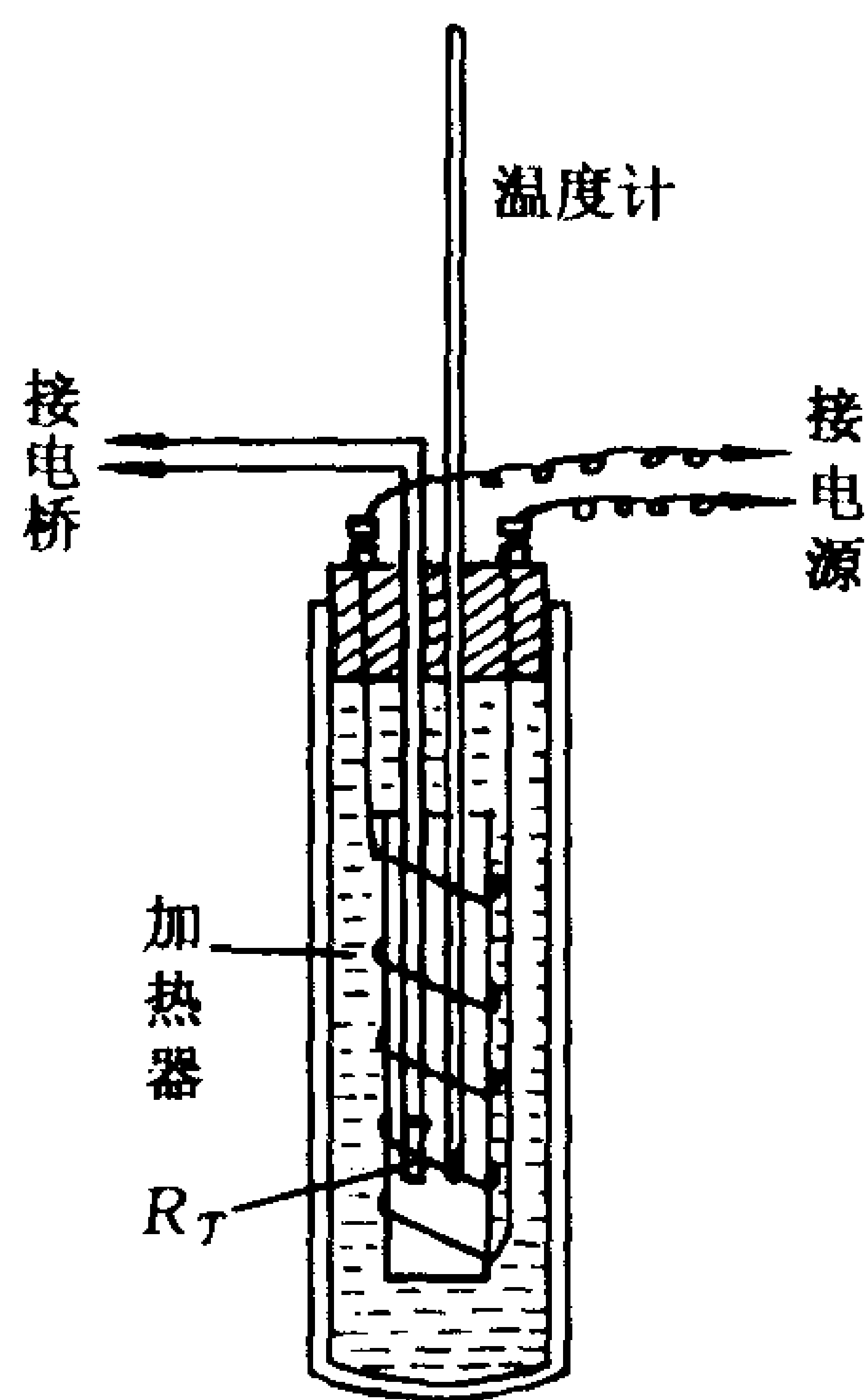


图 6－4　加热瓶

在所用热敏电阻容许温度范围内，测量 8～10 个不同温度条件下 R_T 的电阻值.

测量时，先使 $R_1 = R_2$，R_p 尽量大些，R_0 取一适当值（先用万用表粗略测一下 R_T），其次，先闭合 K_E、K_G 观察检流计指针的偏转，调 R_0 直至指针不动. 减小 R_p 后再观察. 根据阻值大小，还可以改变 R_1、R_2 的比值（比如 $R_1 : R_2 = 1 : 10$）增加 R_0 的有效位数.

参照式（6－4）、（6－3），用图解法、计算法或最小二乘法求出参数 a、b 值，给出经验公式 $R_T = a e^{b/T}$.

注意计算时，取 $T/\mathrm{K} = t/℃ + 273$.

2. 热敏电阻温度计

依据所用热敏电阻的性能、实验室条件和实验者的期望，确定所设计的热敏电阻温度计的测温范围 $t_1 \sim t_2$（例如 0～50 ℃）.

利用图 6－2 电路，使加热瓶中的温度保持在 t_1（单位为℃），测得 R_T 之值为 $R_T(t_1)$，再使瓶中温度为 t_2（单位为℃），又测出 R_T 的值为 $R_T(t_2)$.

为了测绘定标曲线，改用图 6－3 电路，调 R_N 等于 $R_T(t_1)$，R_M 为 $R_T(t_2)$，取 $R_1=R_2$. 转动开关 K_1 指向 N，由 R_N 定标微安表的“0”为 t_1. 具体操作是：按下电键 K_E、K_G 后，调 R_0 使微安表指针指“0”，减小 R_p 再细调 R_0 使指针准确指“0”，以后 R_0 不要再动！其次，用 R_M 定标微安表的满刻度为 t_2，将 K_1 转向 M，调 R_p（不许动 R_0！）使指针指向满刻度即可.

以下定标微安表上其它刻度对应的温度值. 将 K_1 转向 P，使加热瓶中的温度从 t_1 逐渐升至 t_2，测出在升温中 10 个温度条件下微安表的示值 I. 作 $t-I$ 曲线如图 6－4，即为此温度计的定标曲线.

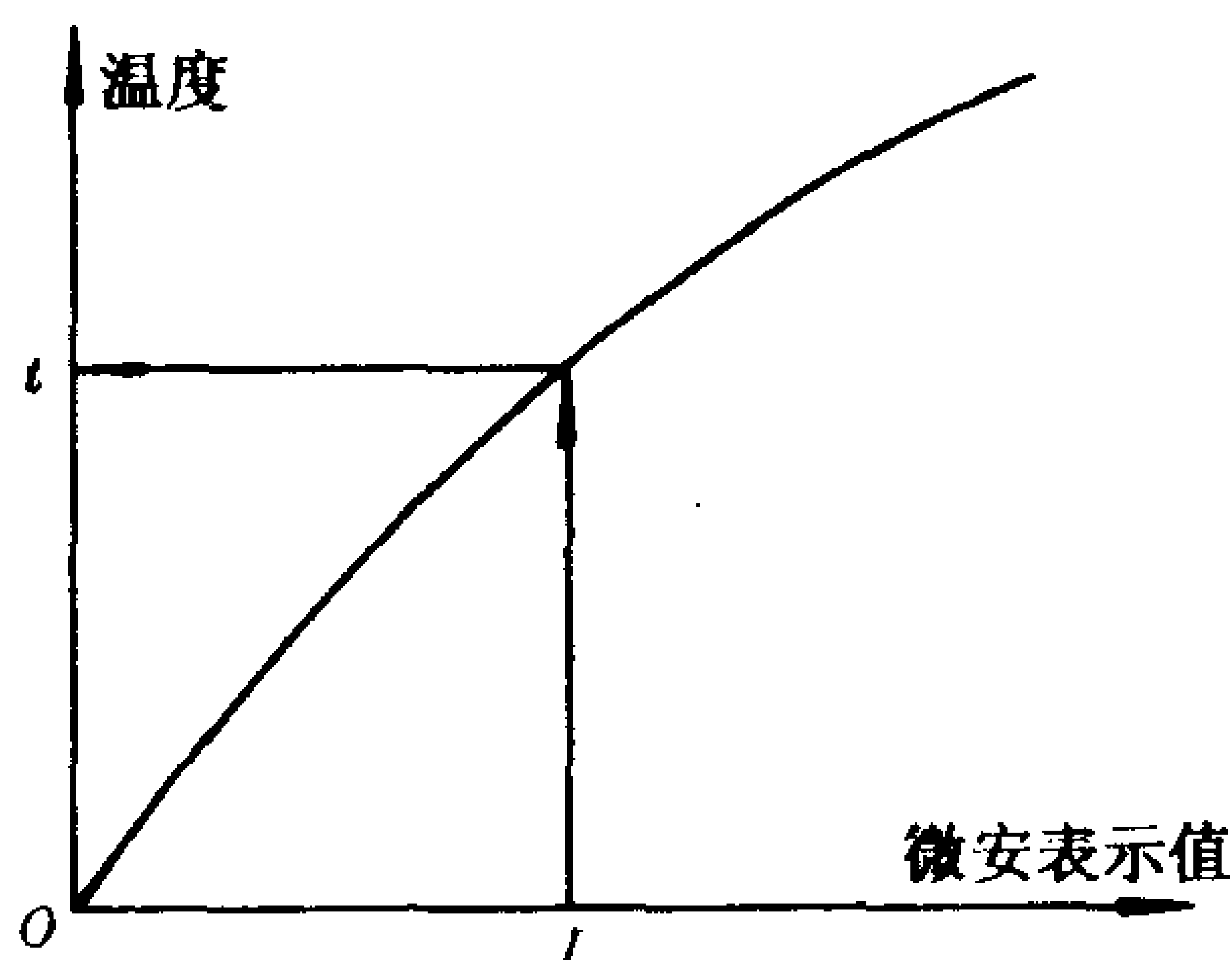


图 6－5　定标曲线

使用此温度计时，K_1 指向 P，R_T 置于被测温度处，从微安表示值和定标曲线就可得出被测温度值 t（单位为℃）.

3. 使用热敏电阻温度计测温

(1) 测一下自己身体几个部位的温度.

(2) 将一铁棒加热（用热水加热）到 t_2（单位为℃）附近，用热

敏电阻温度计测它的表面温度,要将其温度变化的规律 $t=f(\tau)$ (τ 为时间)表示出来,该如何做呢? 如有时间可以测一测.

预习思考题

1. 怎样测定热敏电阻的温度特性曲线?
2. 怎样用实验的方法确定 6-2 式中的 a 和 b?
3. 图 6-3 中的 K_G 与 K_E 有什么作用? 试加以说明.
4. 说明半导体温度计的工作原理.
5. 制作一只半导体温度计的主要步骤和校正方法是什么?

复习思考题

1. 试用测得的实验值写出 $R_T=R_T(T)$ 的数学表达式,并确定有关常数.
2. 试比较回归法与作图法的优缺点.
3. 半导体温度计的电桥与测量热敏电阻值的电桥两者有何区别?

实验七　用板式电势差计测量电池的电动势和内阻

目的

1. 掌握用电势差计测量电动势的原理；
2. 测量干电池的电动势和内阻.

仪器和用具

板式电势差计、检流计、标准电阻、电阻箱、滑线变阻器、标准电池、直流电源、待测干电池.

原理

电势差计是一种电势差测量仪器. 它的工作原理与电桥测电阻一样，是电势比较法. 其中板式电势差计的原理直观性较强，有一定的测量精度，便于学习和掌握，而箱式电势差计是测量电势差的专用仪器，使用方便，测量精确度高，稳定性好. 此外，由于许多电学量都可变为电压的测量，因此电势差计除了电势测量之外还可测量电流、电阻等其他量. 本实验讨论板式电势差计测量电池的电动势和内阻的原理和方法.

板式滑线电势差计的电路如图 7－1 所示. 图中 MN 为一根粗细非常均匀的电阻丝，它与可变限流电阻 R_p 以及工作电池 E、电源开关 K_E 互相串联. E_s 为标准电池，有关标准电池的介绍可参阅绪论 §5－5. E_x 为待测电池的电动势. G 为检流计. 当 K_E 接通，K_G 既不与 E_s 接通又不与 E_x 相连时，则流过 MN 的电流 I 和 ab 两端的电压 U_{ab} 分别为

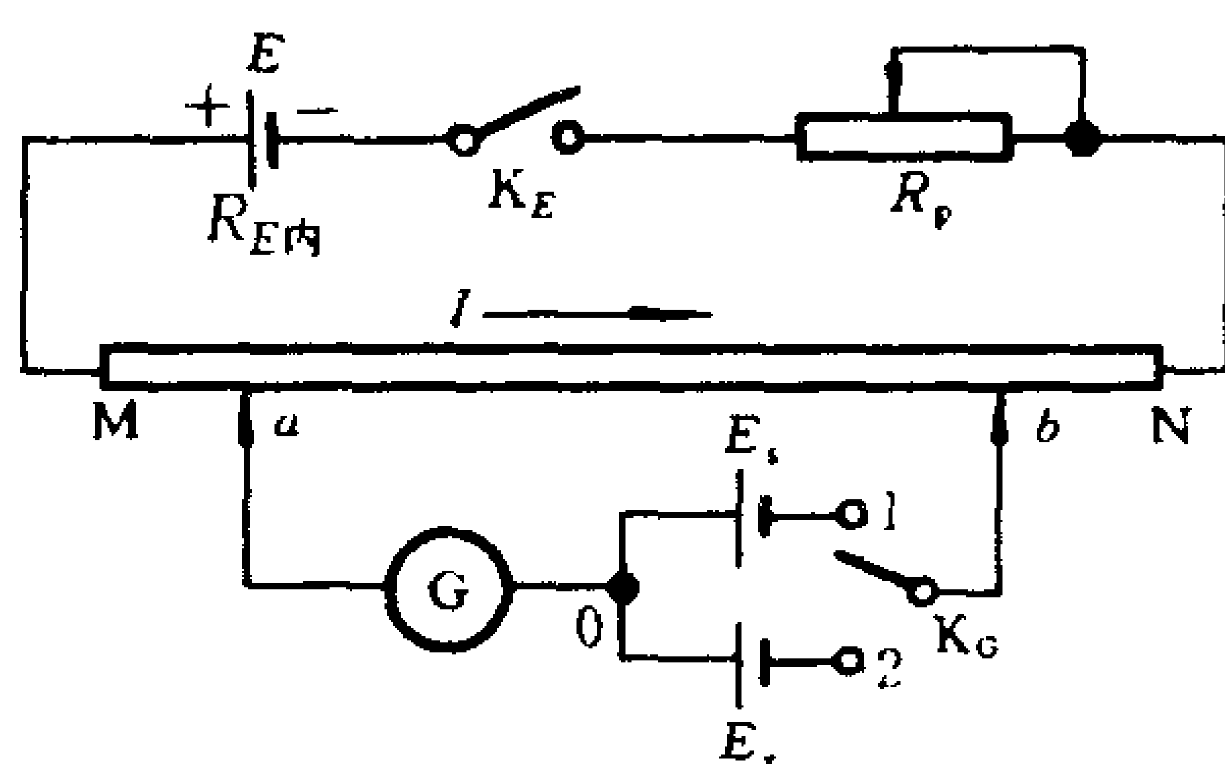


图 7－1　电势差计原理图

$$I=\frac{E}{R_p+R_{MN}+R_{E内}} \tag{7-1}$$

$$U_{ab}=U_a-U_b=\frac{E}{R_p+R_{MN}+R_{E内}}R_{ab} \tag{7-2}$$

式中 $R_{E内}$ 为电源 E 的内阻. 当电键 K_G 倒向 1 时,则 ab 两点间接有 G 和 E_s. 若 $U_{ab}>E_s$ 时,标准电池充电,检流计的指针发生偏转;若 $U_{ab}<E_s$ 时,标准电池放电,检流计指针反向偏转;若 $U_{ab}=E_s$ 时,检流计指零,标准电池无电流流过,则 U_{ab} 就是标准电池的电动势,此时称电势差计达到了平衡. 令 ab 间的长度为 l,则电阻丝单位长度的电压降为 E_s/l, 如果 $E_s=1.018\ 66$ V, $l=10.186\ 6$ m,那么 $E_s/l=0.100\ 000\ \mathrm{V\cdot m^{-1}}$. 当电键 K_G 倒向 2 时,则 ab 两点间的 E_s 换接了 E_x. 由于一般情况下 $E_x\neq E_s$,因此检流计指针将左偏或右偏,电势差计失去了平衡. 如果合理地移动 a 和 b 点以改变 U_{ab} 值,当 $U_{ab}=E_x$ 时,电势差计又重新达到平衡,令 ab 间的距离为 l_x,则待测电池的电动势为

$$E_x=(E_s/l)l_x \tag{7-3}$$

如果在数值上 E_s 足够准确地为 l 的 10^n 倍, E_x 的有效数字与 l_x 完全相同. 因此当 E_s 接在 ab 两端时, l 值应该与 E_s 的有效数字相同,但此时 I_G 不一定等于 0,这可借助于 R_p 的调节使电势差计处于平衡状态. 这种满足 $E_s/l=10^n$ 的 R_p 调节过程称为电

势差计工作电流标准化的过程．上述取 $l=10.1866\ m$ 就是使电势差计的工作电流成为标准化电流．按照 $E_s/l=0.100\ 000\ V/m$，(7－3)式可写成

$$E_x = 0.100\ 000 l_x \tag{7-4}$$

所以调节平衡后，只要量度 l_x 值就很容易得到待测电池的电动势．

下面讨论怎样用电势差计测量电池的内阻．

根据全电路欧姆定律 $U=E-IR_{内}$ 可知，为了测定电池内阻 $R_{x内}$，必须要电池放出一定的电流 I，通常情况下 $R_{x内}$ 为常数，为了控制回路中 I 的大小，要设置限流器 R，电流的测量采用电流－电压变换法，即测量阻值足够准确的电阻器两端电压，根据电压除以电阻算出电流值，因此测量电池内阻的实验线路如图 7－2 所示．

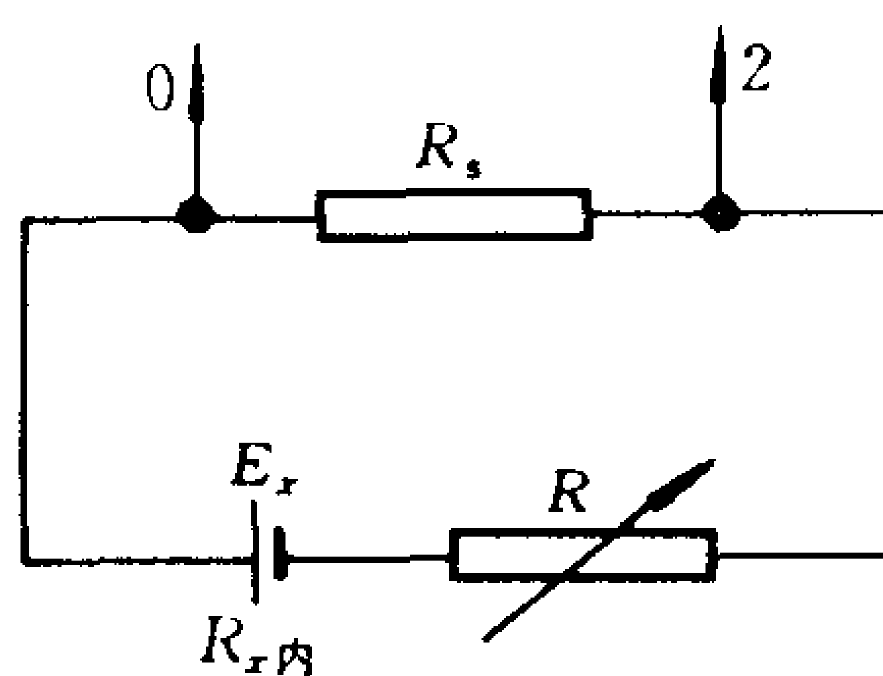


图 7－2　测量电池内阻

$$U = E_x - \frac{U_{02}}{R_s} R_{x内}$$

由于待测电池电动势 E_x 为常量，$U=I(R+R_s)=\dfrac{U_{02}}{R_s}(R+R_s)$，因此

$$\frac{U_{02}}{R_s}(R+R_s) = E_x - \frac{U_{02}}{R_s} R_{x内}$$

化简成

$$U_{02} = \frac{E_x R_s}{R + R_s + R_{x内}} \tag{7-5}$$

式中 U_{02} 与 R 为变量，如果取 R 为自变量，并与待测量 $R_{x内}$ 分开，变换上式，可以得到

$$\frac{1}{U_{02}} = \frac{R_s + R_{x内}}{E_x R_s} + \frac{1}{E_x R_s} \cdot R \tag{7-6}$$

显然$\frac{1}{U_{02}}$与 R 成线性关系，其中斜率 $b=\frac{1}{E_x \cdot R_s}$，则 $E_x=1/(b \cdot R_s)$；而截距为

$$a=\frac{R_s+R_{x内}}{E_x \cdot R_s}=b(R_s+R_{x内})，则\ R_{x内}=\frac{a}{b}-R_s \qquad (7-7)$$

本实验中所用的板式电势差计又称为十一线电势差计，它的构造如图 7-3 所示．它实际上是一根 11 m 长、截面非常均匀的电阻丝，折成十一段都是一米长的导线，固定在平板上，其中 a 端通过导线和插头可与 1、2、…、10 等十个插座中任何一个相连接．b 端是滑动块与铜片接触点的引出端，其活动范围为 1.000 m，在电势差计调平衡时起微调的作用．滑块与电阻丝接触的 b 点电势，由顶端接线柱引出．滑块的箭头指示滑块的位置，由米尺读出，如果电势差计的灵敏度足够高，则 l 可读到 mm 位．若要取 $l=10.1866$ m 时，可将 a 插入"10"插座，b 移动到"0.186 6 m"的位置，其中最后一位数字"6"已属于估计位．如果测 E_x 时，电势差计已调到平衡，其中 a 的位置是 5，b 的位置指示着 0.085 3 m，那么待测电池的电动势 $E_x=0.100\,000\times5.085\,3\ \text{V}=0.508\,53\ \text{V}$.

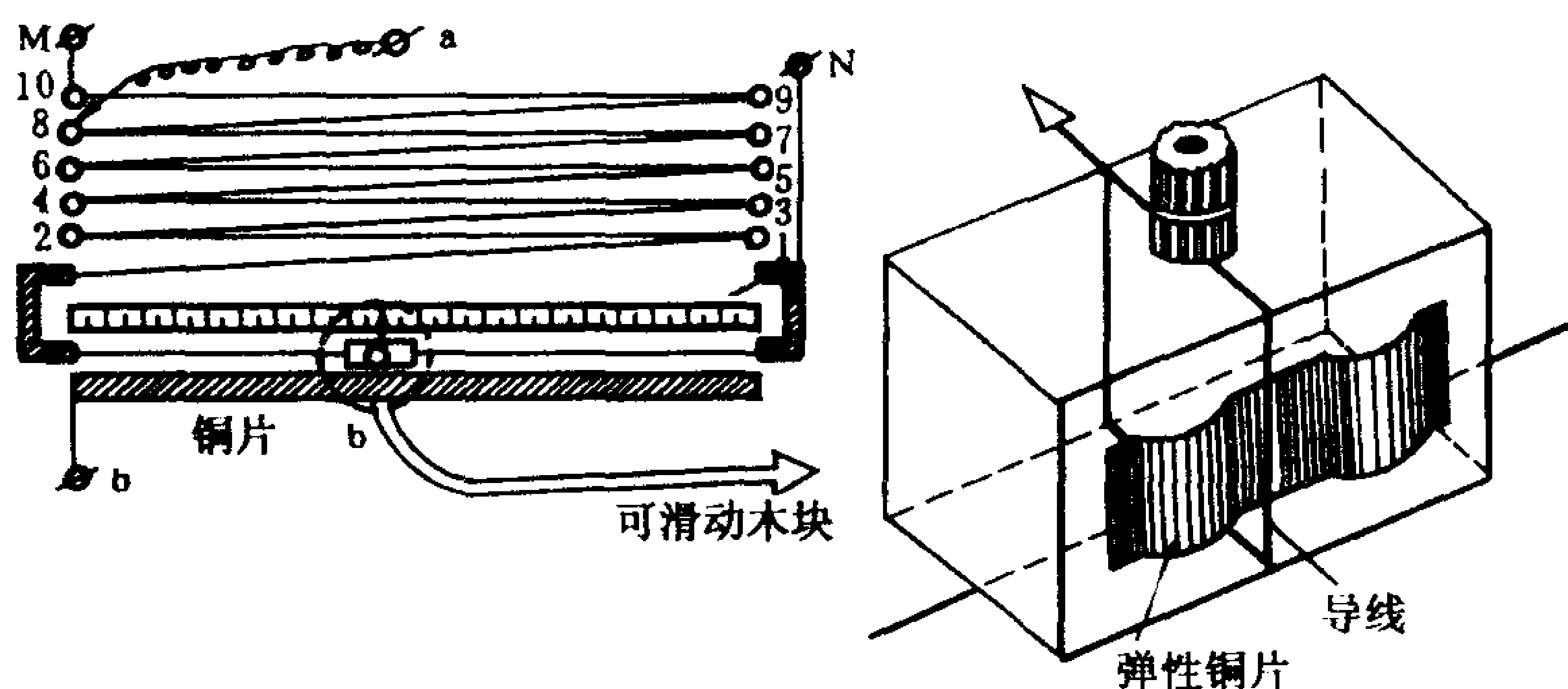


图 7-3　板式电势差计装置图

由以上介绍不难理解：

1. 调节电势差计平衡的必要条件是 E、E_s 和 E_x 的极性不能

接错，并且需满足 $E>E_s$，$E>E_x$ 诸条件.

2. 如果 $E_x>E$，为了测量待测电池的 E_x，必须采取如图 7－2 所示的分压方法，但仍要满足 $U_{02}<E$ 的必要条件.

3. 为了使电流标准化调节方便和精细，R_p 应采用大、中、小、三种阻值可变的电阻器串联起来使用. 一旦电流标准化调节完毕，在测量 E_x 或 U_{02} 时不能再更动 R_p，更不能调换工作电池 E，否则读数不准确，测量结果中存有系统误差或错误.

4. 鉴于板式电势差计的十一根电阻丝长度不可能完全相等，因此长度测量存在着系统误差(δl). 只有待测量 E_x 在 1.018 66 V 左右的电动势才比较准确，差值越大结果越不准确.

步骤和要求

1. 按图 7－4 接线，图中 R_p 由两只阻值相差甚大的滑线变阻器串联而成，R 为电阻箱，R_s 为标准电阻器. E_s 和 E_x 分别为标准电池和待测电池的电动势. 虚线框内就是十一线电阻丝，a 为粗调接线柱，b 为细调滑动块.

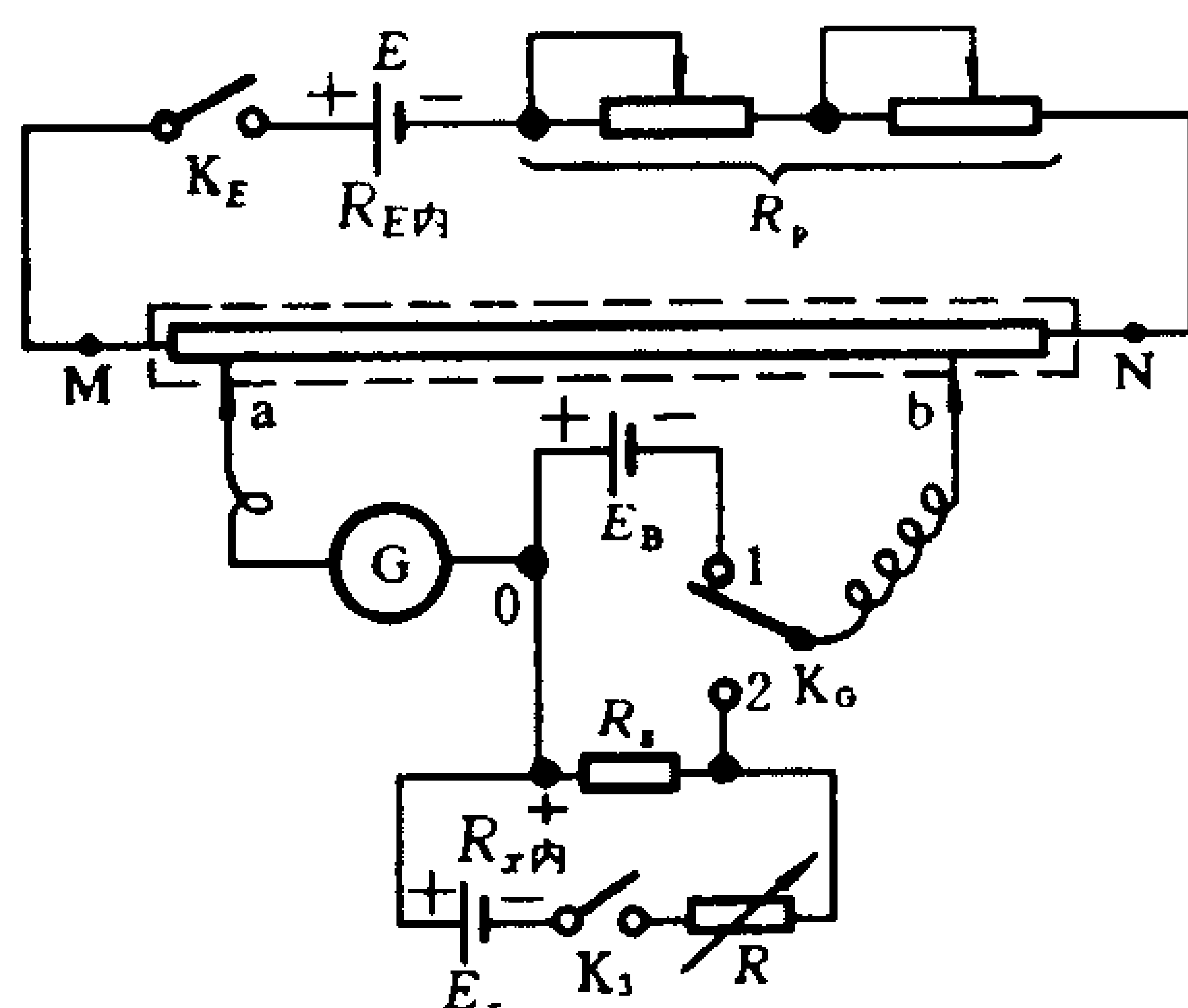


图 7－4 测量电池的电动势和内阻

2. 电流标准化调节

通过下式可以计算出室温 t 时标准电池的电动势 E_s：

$E_s = E_{20} - E'$

$\{E'\}_V = [39.9 \times (\{t\}_{℃} - 20) + 0.94 \times (\{t\}_{℃} - 20)^2 - 0.009 \times (\{t\}_{℃} - 20)^3] \times 10^{-6}$

式中 E_{20} 表示温度为20℃时的电动势(标准电池上已注明其值)，$\{E'\}_V$ 表示 E' 以V为单位时的数值，$\{t\}_{℃}$ 表示 t 以℃为单位时的数值. 置a、b间的长度为 $10 \times (E_s/\mathrm{V})\mathrm{m}$，如 $E_s = 1.018\ 66\ \mathrm{V}$，则a、b间的长度为10.186 6 m. 接通 K_E，将 K_G 与1端相连，精细调节 R_p，使 $I_G = 0$，即电势差计达到平衡，完成了电流标准化调节程序.

3. 测量 U_{02} 值已知待测电池的电动势 $E_x = 1.5\ \mathrm{V}$ 左右，放电电流要大于100 mA才稳定(当然不宜过大)，因此取 $R_s = 10\ \Omega$，使 R 从0到5 Ω变化，测量 U_{02} 值.

4. 取 R 为横坐标，$\frac{1}{U_{02}}$ 为纵坐标，将上述测到的数据作 $\frac{1}{U_{02}} - R$ 图，根据图线求得截距和斜率的值，再算出待测电池的电动势及其内阻.

5. 根据截距和斜率的不确定度及不确定度传递公式，估算出待测电池电动势和内阻的不确定度.

预习思考题

1. 为什么要进行电流标准化调节?
2. 为什么电势差计能测量待测电池的电动势? 而不是端电压?
3. 怎样用电势差计测量待测电池的内阻?
4. 为什么板式电势差计采用十一线而不用九线方式?
5. 调节电势差计平衡的必要条件是什么? 为什么?

复习思考题

1. 在电势差计调平衡时发现检流计指针始终朝一个方向偏，这可能是

什么原因?

2. 为什么说电势差计采用了电势比较法? 提高电势差计的准确度应注意哪些方面?

3. 板式电势差计能否“扩大量程”,要扩大量程应采取什么措施?

4. 经过实验测量和使用,你认为板式十一线电势差计应怎样改进? 说出改进的方法及其原理.

实验八　用箱式电势差计校正电表

目的

1. 了解箱式电势差计的结构和原理；
2. 比较熟练地正确掌握箱式电势差计的使用；
3. 运用箱式电势差计校正电压表(或电流表).

仪器和用具

箱式电势差计、标准电池、直流电源[①]、检流计、滑线变阻器、电阻箱、待校正电表、开关和导线.

原理

箱式电势差计是用来精确测量电池电动势或电势差的专门仪器.它给出准确可变的电势差并采用电势比较方法依据补偿原理进行测量,由于与之配合使用的标准电池电动势非常稳定,用作电压比较指示的灵敏电流计灵敏度甚高,加上箱式电势差计的电压比较电路精确度较高,因此,能精确地测量待测的电势差和电池的电动势.

如图8－1所示,由工作电源E、电阻R_{AB}、限流电阻R_p构成

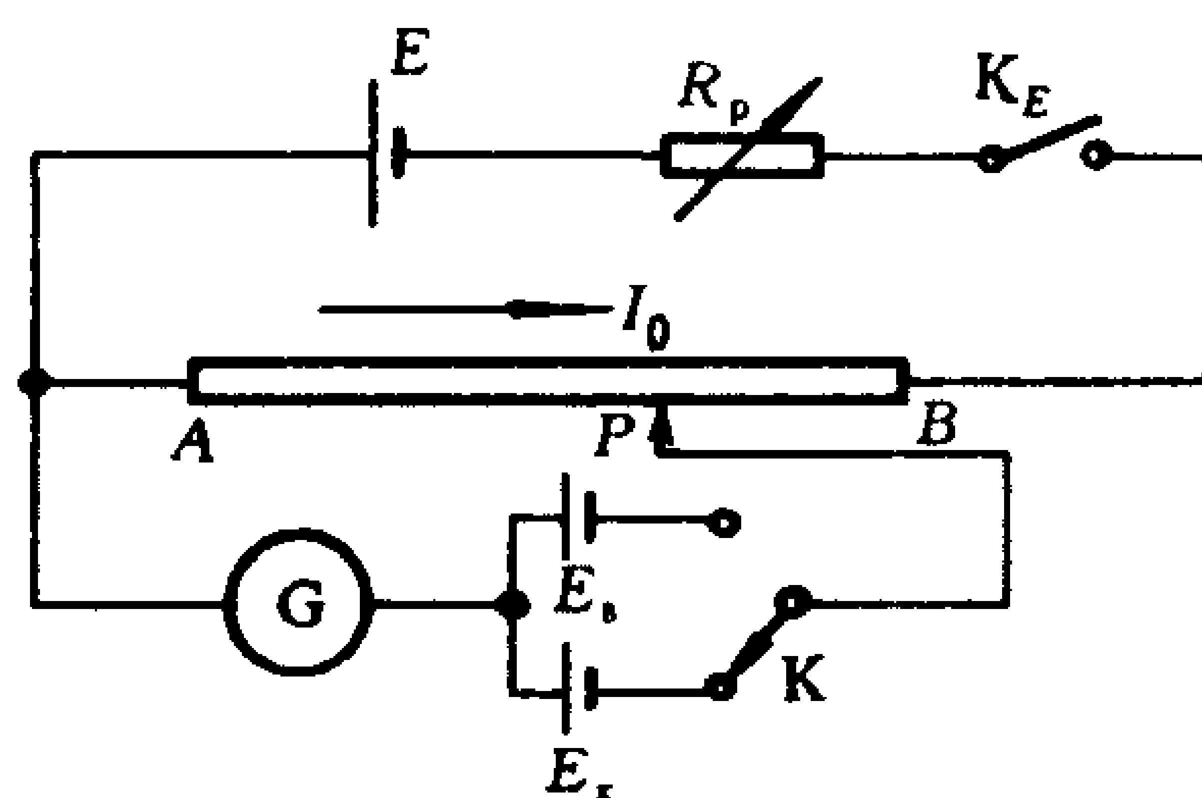


图8－1

① 最好用蓄电池或大容量干电池(稳压电源的稳定性不理想).

一测量电路，其中有稳定而准确的电流 I_0；电源 E_x 和检流计 G 组成一补偿分路，调节 P 点使 G 中电流为零，AP 间电压为 V_{AP}，则

$$E_x = V_{AP}$$

而 $V_{AP} = R_{AP} \cdot I_0$（$R_{AP}$ 为 A、P 间电阻），所以

$$E_x = R_{AP} \cdot I_0 \tag{8-1}$$

即当测量电路的电阻与电流已知时，可得 E_x 之值，如将 E_x 改用标准电池 E_s，可得 $E_s = R_s \cdot I_0$，或 $I_0 = \dfrac{E_s}{R_s}$，代入式(8－1)得

$$E_x = \frac{R_{AP}}{R_s} E_s \tag{8-2}$$

通过滑线变阻器 P 点的调节，进行二次电压比较，取平衡时的 R_{AP} 和 R_s 值，根据式(8－2)可求得待测电源 E_x 的电动势值.

1. 箱型电势差计的工作电流与电压值标度

用箱式电势差计测量电压时，并不需要用式(8－1)或(8－2)去计算，它是将测量范围内的电压值标在面板上，通过补偿测量可以从面板上直接读出被测电压值.

如图 8－2，将图 8－1 中的电阻 R_{AB} 改为相同电阻 R 的串联电路. 设计仪器时先规定仪器的工作电流 I_0（例如 UJ24 型电势差计 $I_0 = 0.000\ 100\ 00$ A），其次按 $R = \dfrac{0.100\ 00\ \text{V}}{I_0}$ 确定 R 的精确值，这样制作的电势差计其 a、b、c…各点和 A 点电势差精确为 0.1 V、0.2 V、0.3 V、…（即准确可变的电势差），因此可将这些电压值标在 a、b、c…各点处. 箱式电势差计面板上的电压值标度就

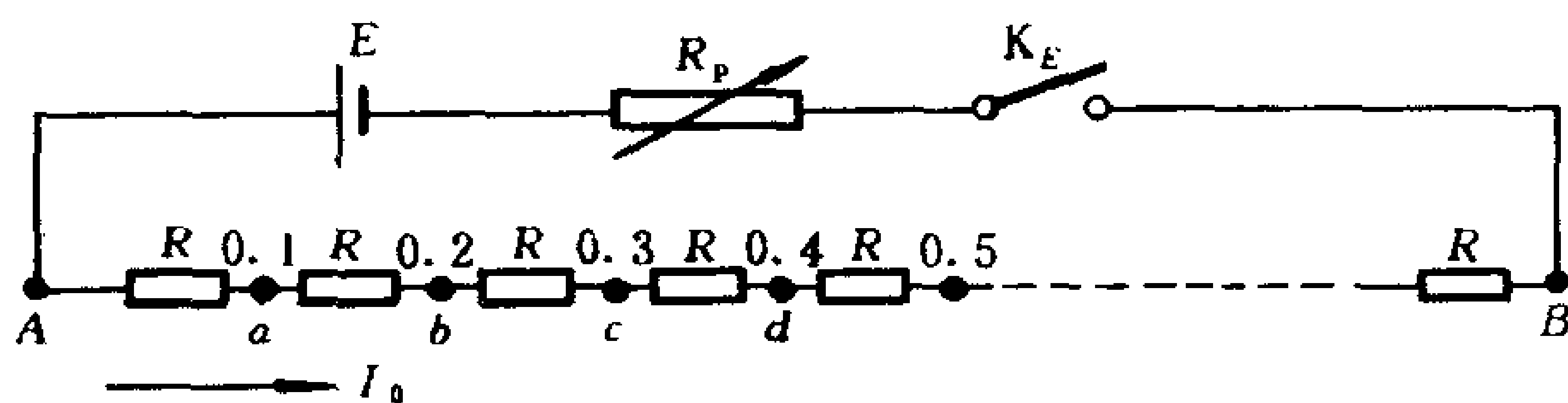


图 8－2

是按此原理进行的．当然实际仪器的电路要复杂得多，图8－2仅是标度方法的示意图．

使用此标度过的电势差计去测量，可如图8－3，移动P点当检流计G中电流为零时，则P点处的示值将等于电动势E_x之值．

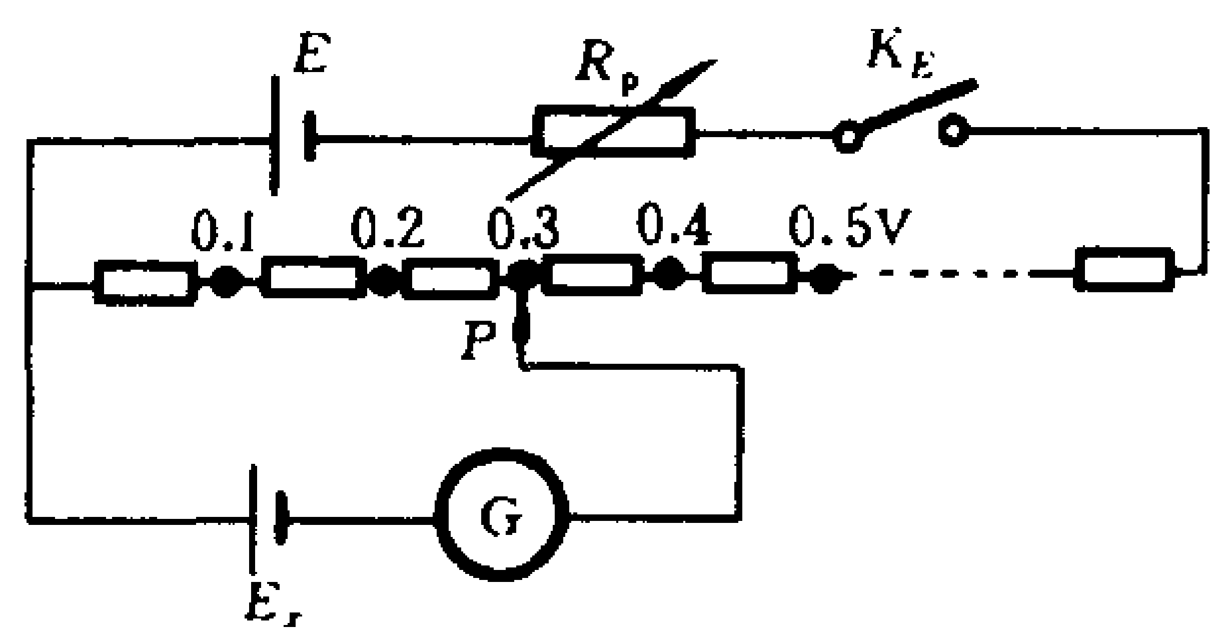


图8－3

2．标准电池与工作电流的校准

为使图8－2中a、b、c、d、…各点的实际电压值和标度值一致，必须使实验时电路中的电流和设计的工作电流I_0一致．在电路中加入一个电流计可以检查实际电流的大小，但是就是很准确的0.2级电流计，也只能控制0.2％的准确程度，而箱式电势差计则要求控制到0.01％或更精确．实际上箱式电势差计是用准确度甚高的标准电池去监控工作电流的（标准电池的电动势之值可有6位有效数字！）．

图8－4的电路是在图8－2的电路中加入用标准电池E_s监控电流的校准电阻R_s．例如20℃时所用饱和式标准电池的电动势为1.018 59 V，则在设计时使电阻R_s在EK间阻值R_{EK}＝

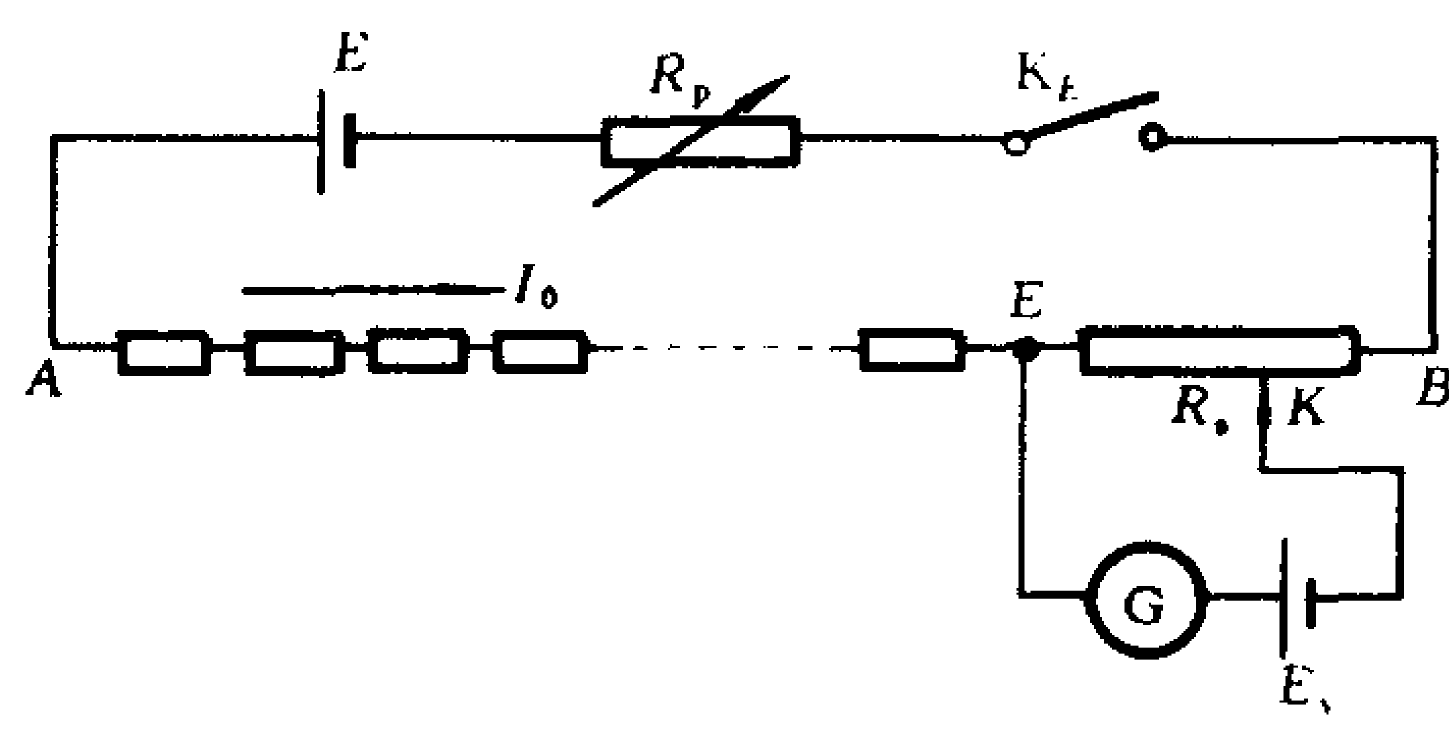


图8－4

$\frac{1.018\ 59\ \text{V}}{I_0}$,并在 K 点处标以 1.018 59 V,以后每在 20 ℃使用此仪器时,先将 K 移至 1.018 59 V 处,调节限流电阻 R_p,当检流计读数为零时,测量电路中的电流即等于设计的工作电流 I_0.

从以上讨论可知,用电势差计测量 E_x,是先用标准电池 E_s 校准测量电路的工作电流 I_0,再用测量电路和 E_x 去比较,即 E_x 是通过电势差计和 E_s 相比较的. 检流计是比较的检查设备,精密的电势差计要配备与之适应的灵敏度较高的检流计.

3. 用电势差计测量电动势(或电压)、电阻及电流

箱式电势差计的原理如图 8-5 所示,待测电池的两极或待测电势差的二点接到 X_1、X_2,图中的双刀双掷开关 S_1 倒向右侧,则检流计和校准电路联接,S_1 倒向左侧则检流计和被测电路联接.

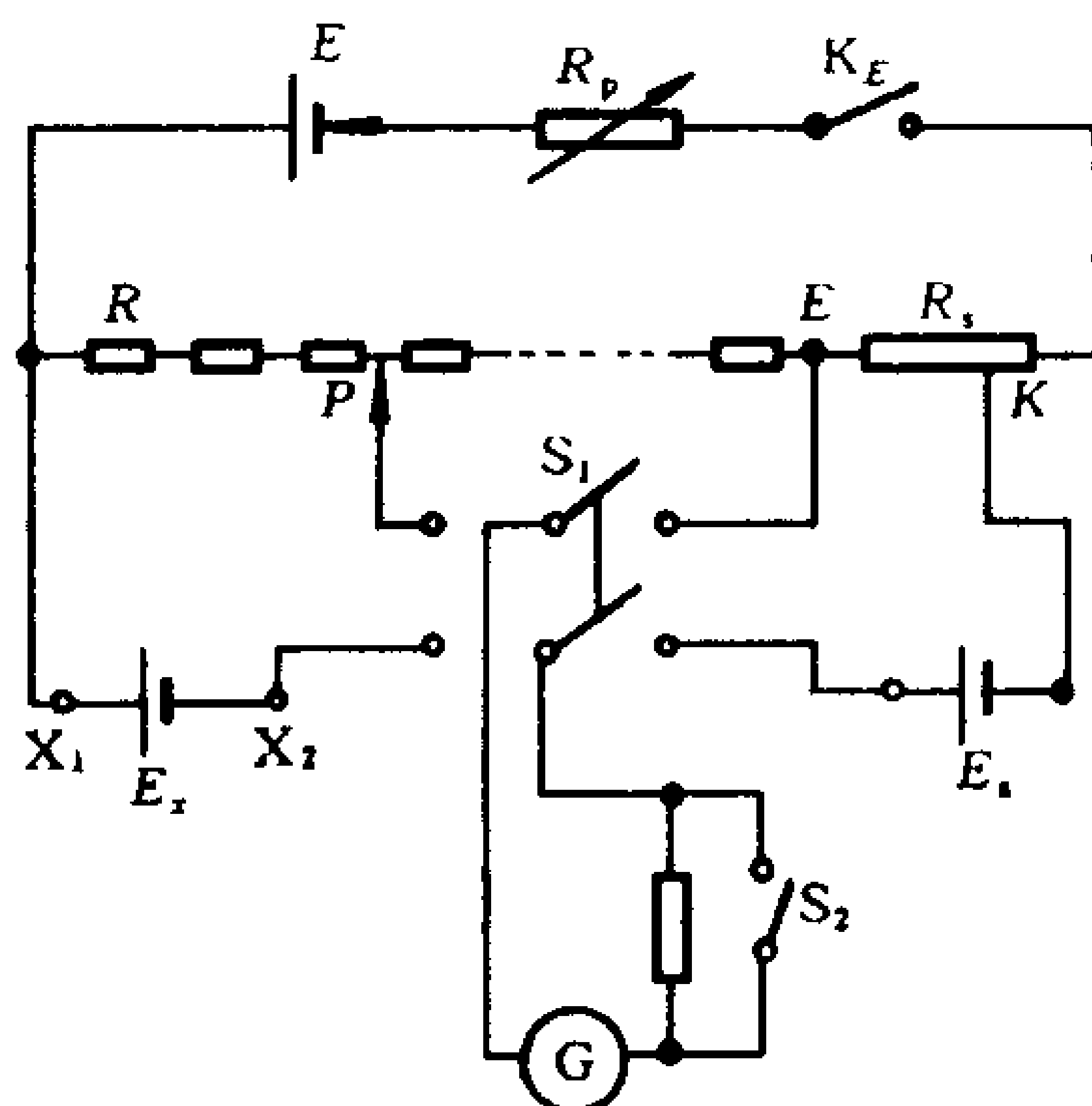


图 8-5

(1) 测电池电动势或 AB 电势差时,可如图 8-6 联接.

(2) 测回路的电流,如图 8-6(b). 当 R 为标准电阻时,测出其两端的电压 U_{AB},则电流 I 等于

$$I = \frac{U_{AB}}{R} \tag{8-3}$$

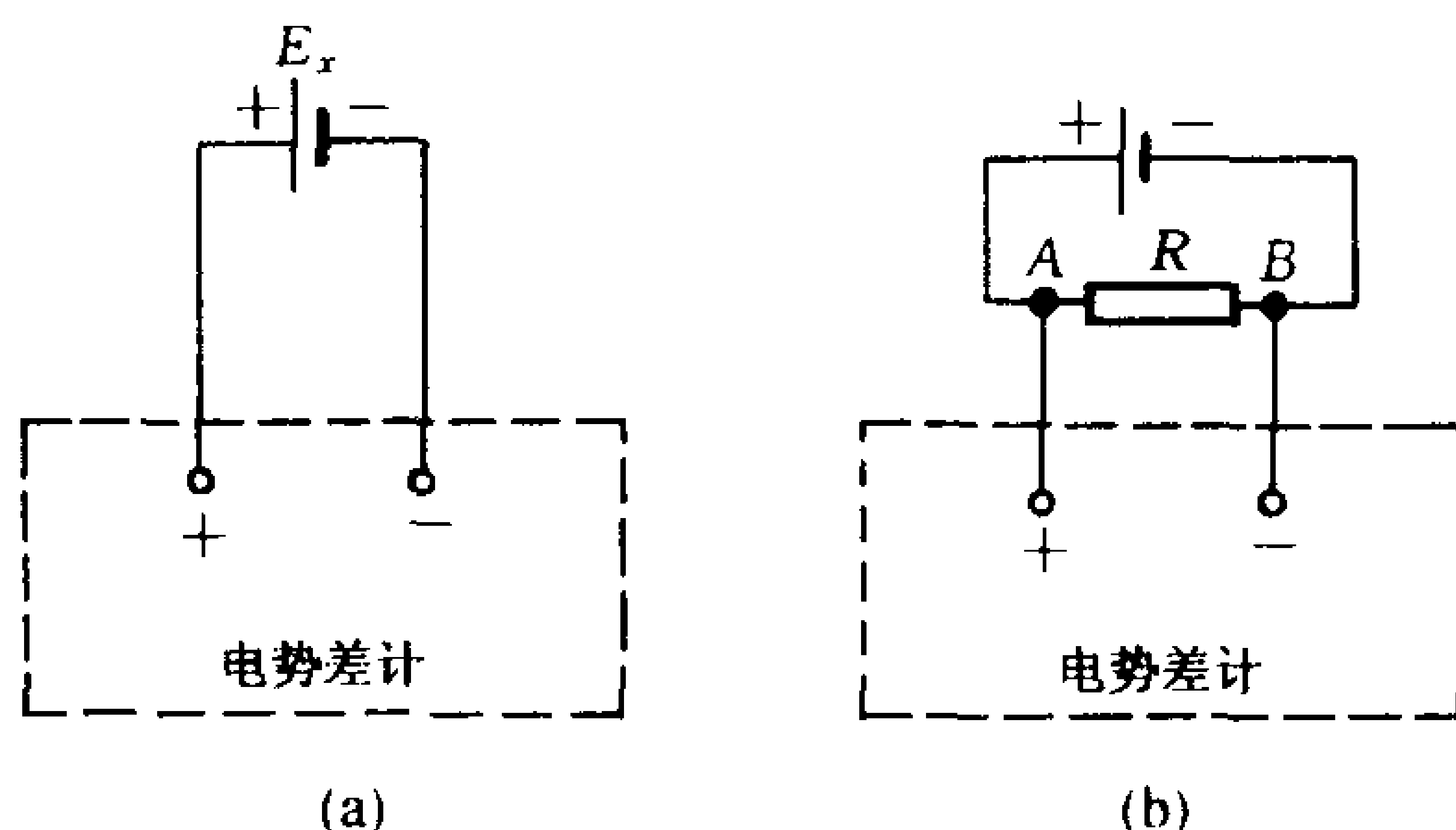


图 8-6

(3) 电阻的测量

如图 8-7,将待测电阻 R_x 和标准电阻 R_s 串联在一电路中,分别测量其两端的电压 U_{AB}、U_{BC},由于回路中电流一定,所以

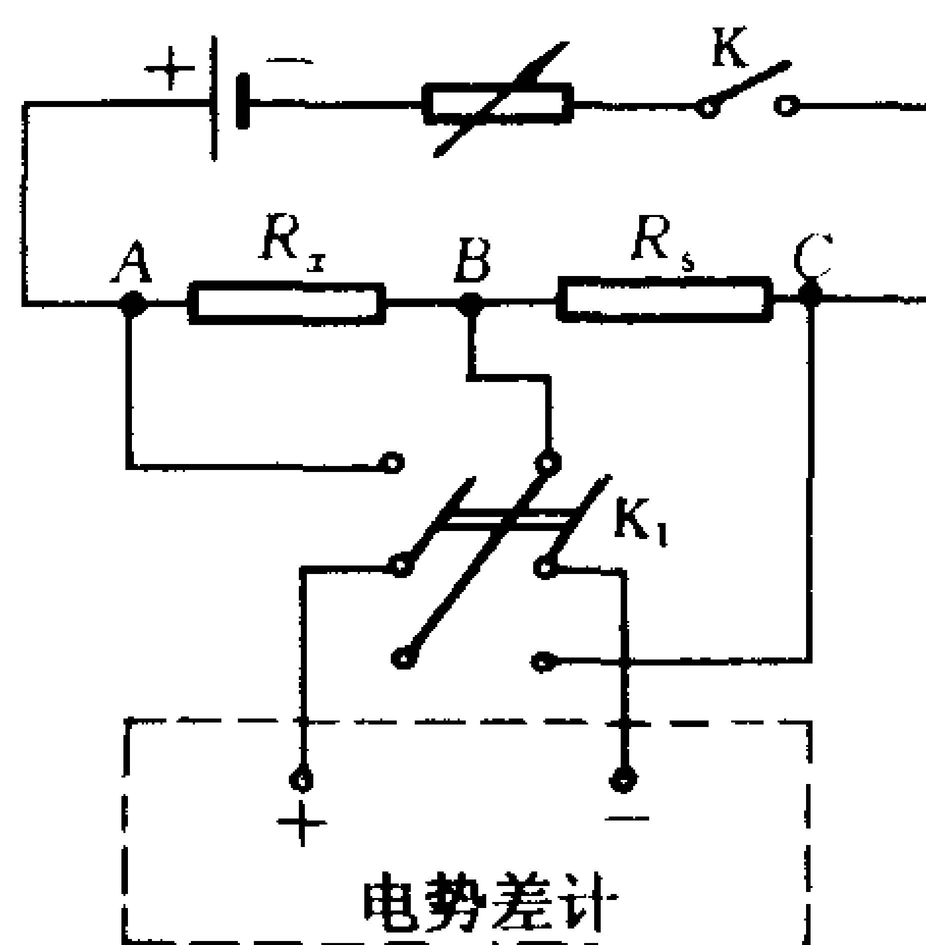


图 8-7

$$\frac{U_{AB}}{R_x}=\frac{U_{BC}}{R_s}$$

即

$$R_x=\frac{U_{AB}}{U_{BC}}R_s \qquad (8-4)$$

图中的开关 K_1 是为了 AB、BC 测量转换用的,有些电势差计将此开关 K_1 装在电势差计的箱中.

4. 电势差计灵敏度、准确度等级及基本误差

当电势差计平衡时,从面板上可读出被测电动势之值 E_x,如果这时移动 P 点使面板值改变 δE,平衡被破坏,检流计相应地发生一偏转 α,则电势差计灵敏度 S_p 定义为

$$S_p=\frac{\alpha}{\delta E} \qquad (8-5)$$

如果测得电势差计灵敏度 S_p,则根据检流计刻度的分辨值 $\Delta\alpha$,求出灵敏度引入的误差 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{\Delta \alpha}{S_p} \tag{8-6}$$

显然，S_p 越大由灵敏度引入的误差越小. 实际上选用灵敏度较高、内阻较小的检流计可以提高电势差计的灵敏度. 但是要注意不是检流计的灵敏度越高，测量误差就越小，因为电势差计的基本误差是由内部电路中各器件的准确度决定的.

直流电势差计的准确度等级分为：0.000 1、0.000 2、0.000 5、0.001、0.005、0.01、0.02、0.05、0.1、0.2 级. 电势差计的允许基本误差 E_{lim} 按下式计算

$$E_{lim} = \pm \frac{a}{100}\left(\frac{U_n}{10} + U_x\right) \tag{8-7}$$

式中 a 为准确度等级，U_x 为标度盘示值，U_n 为基准值(V)，是该量程中 10 的最高整数幂.

实验内容

1. 观察电势差计面板，了解各旋钮的作用.

2. 校准工作电流

查出室温下标准电池的电动势，扭转 R_s 使之符合此值.

由粗到细调节限流电阻 R_p 使电势差计平衡，这就校准了工作电流 I_0，以后不要再动 R_p，实验中途应检查 I_0 是否有变化，如有变化要重新校准.

3. 校正电压表

对实验室指定的电压表进行校正，要在电压表的全量程中，从小到大选 10～15 点进行，即用电压表和电势差计同时逐点测量.

测量电路自己设计(特别注意当电压表量限大于电势差计量限时的处理).

设对同一电压，电压表读数为 U，电势差计读数为 U_p，找出 $|U - U_p|$ 的最大值，并用以确定电压表的等级(参照§5－1).

以 U 为横坐标，$U - U_p$ 为纵坐标作误差图线，注意用折线联

结相邻之点,因为各点的误差有独立性.

4. 校正毫安计

具体要求和 3 相同.

5. 测量电势差计灵敏度.

预习思考题

1. 电势差计为什么能测量电池的电动势? 是否是真正的电动势?
2. 为什么要讨论和测量电势差计的灵敏度?
3. 为什么要使工作电流标准化?
4. 怎样用低电势电势差计校正高电压量程的电压表?

复习思考题

1. 根据误差曲线,能否判别偶然误差和系统误差?
2. 电势差计工作电池不稳定,对电动势的测量有否影响? 工作电池采用稳压电源好还是恒流电源好? 为什么?

[附记]

[1] UJ24 型高电势直流电势差计

此仪器的测量上限为 1.611 10 V,最小分度为 0.000 01 V,准确度等级为 0.02,工作电流为 0.1 mA. 图 8-8 为其面板图.

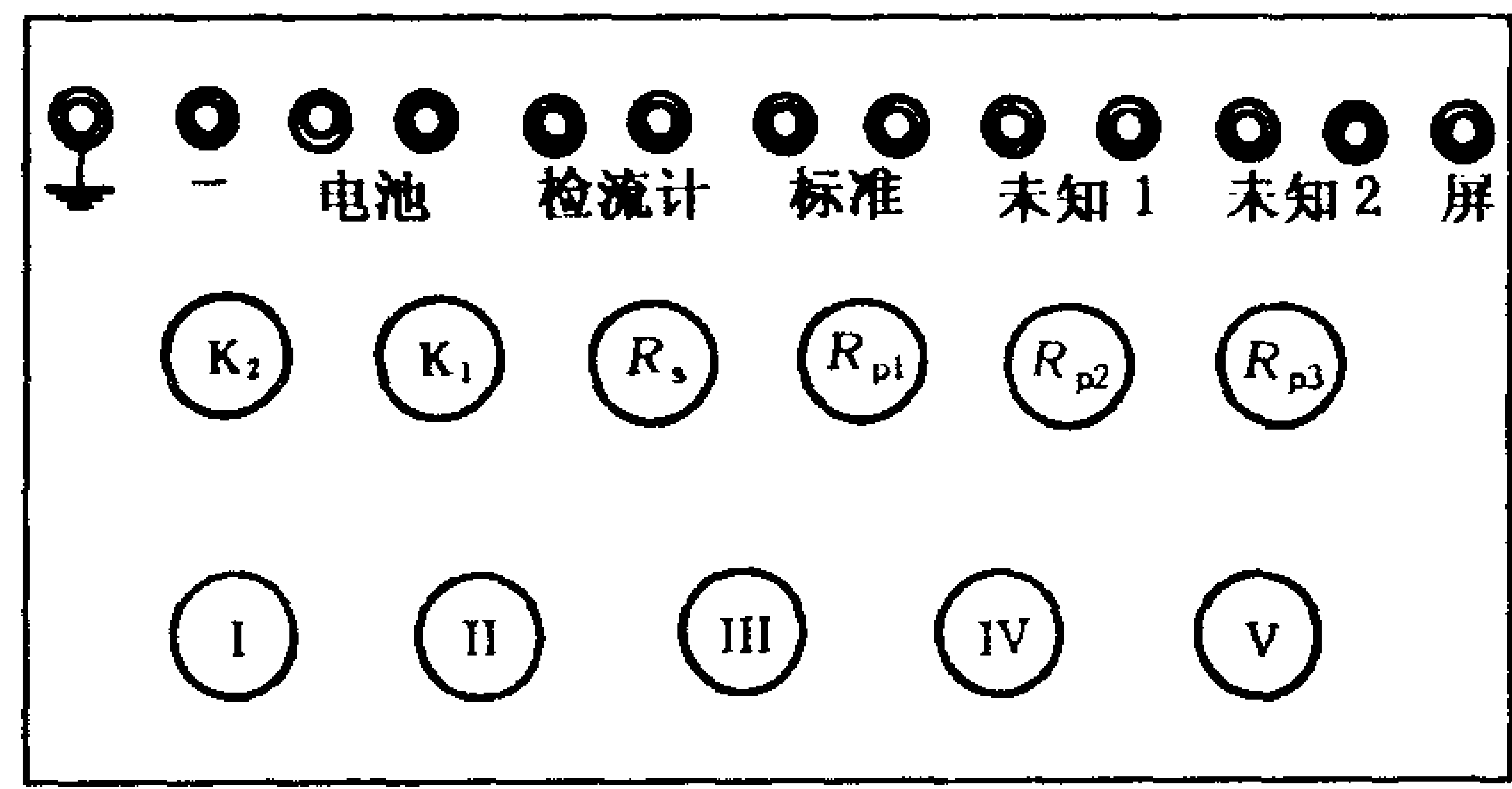


图 8-8

R_{p1}、R_{p2}、R_{p3}为调节工作电流的限流电阻(粗、中、细),转动R_s可给出室温时标准电池电动势,即调整校准电阻.

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ为测量部分

K_1为测量转换开关,指"标准",即和标准电池相比以校准工作电流;指"未知 1"或"未知 2"即测量由端钮"未知 1"或"未知 2"接入的电压.

K_2为检流计开关,分为"细"、"中"、"粗"、"短路"、"输出"等五档,使用时按粗、中、细使用,"短路"可用于控制检流计的摆动,指"输出"档时检流计短路,在"未知"端钮有对应测量盘示值的电势输出,两档之间为"断",它将检流计与测量电路断开,不测量时应转到"断"的位置.

[2] UJ－31 型电势差计

UJ－31 型是一种低电势、双量程的电势差计. 准确度等级为 0.05,工作电流 10 mA. 量程开关K_1指"×10"档时,能测量未知电动势的最大值为 171 mV,K_1指"×1"时,可以测量未知电动势的最大值为 17.1 mA,图 8－9 为其面板图,电路与图 8－10 相似,工作电源电压要求在 5.7～6.4 V 间,可以同时将两个被测电压接到"未知1"和"未知2". 转钮R_s用来移动图8－5中K的位置,使

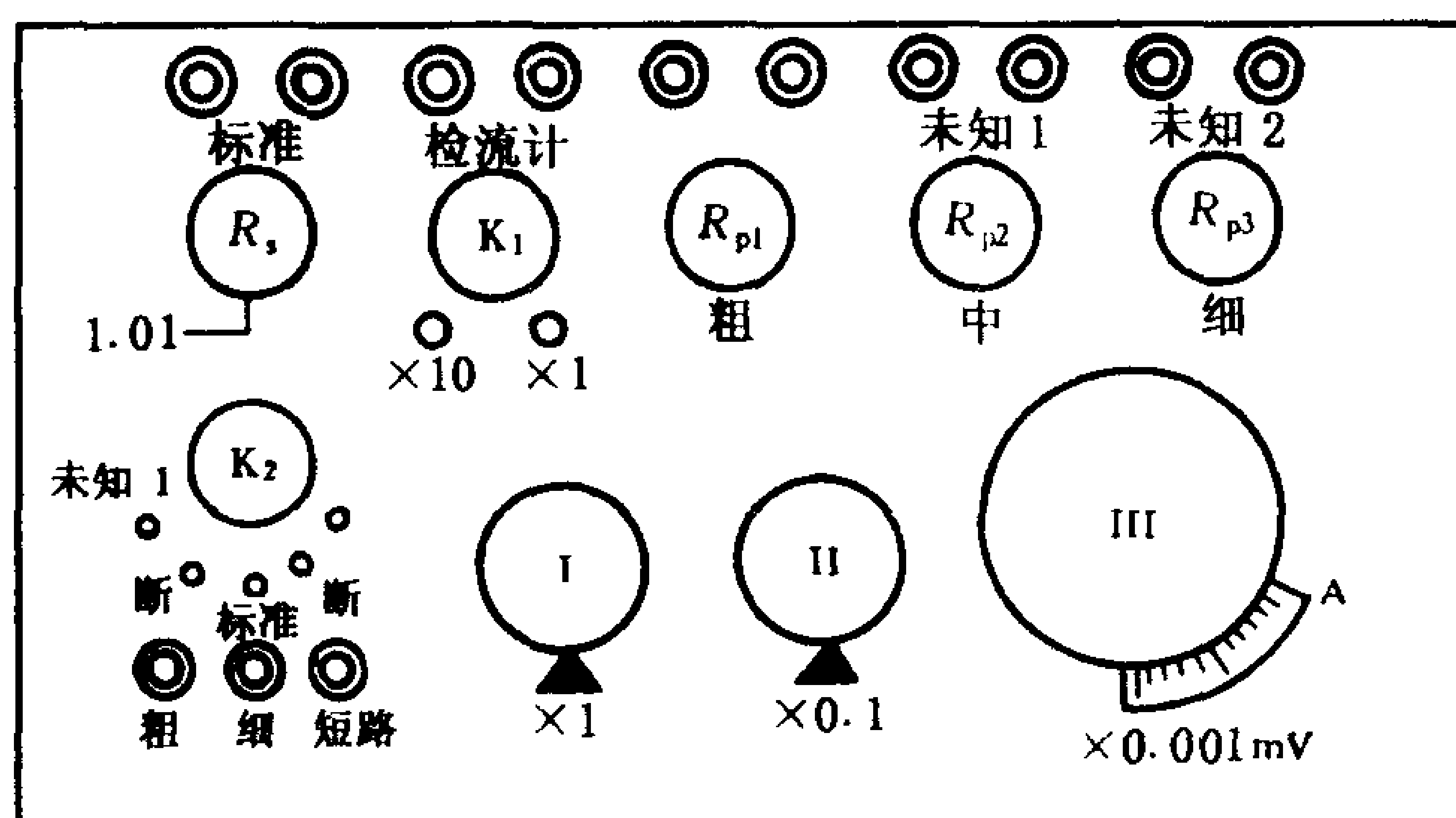


图 8－9 UJ31 型电势差计面板图

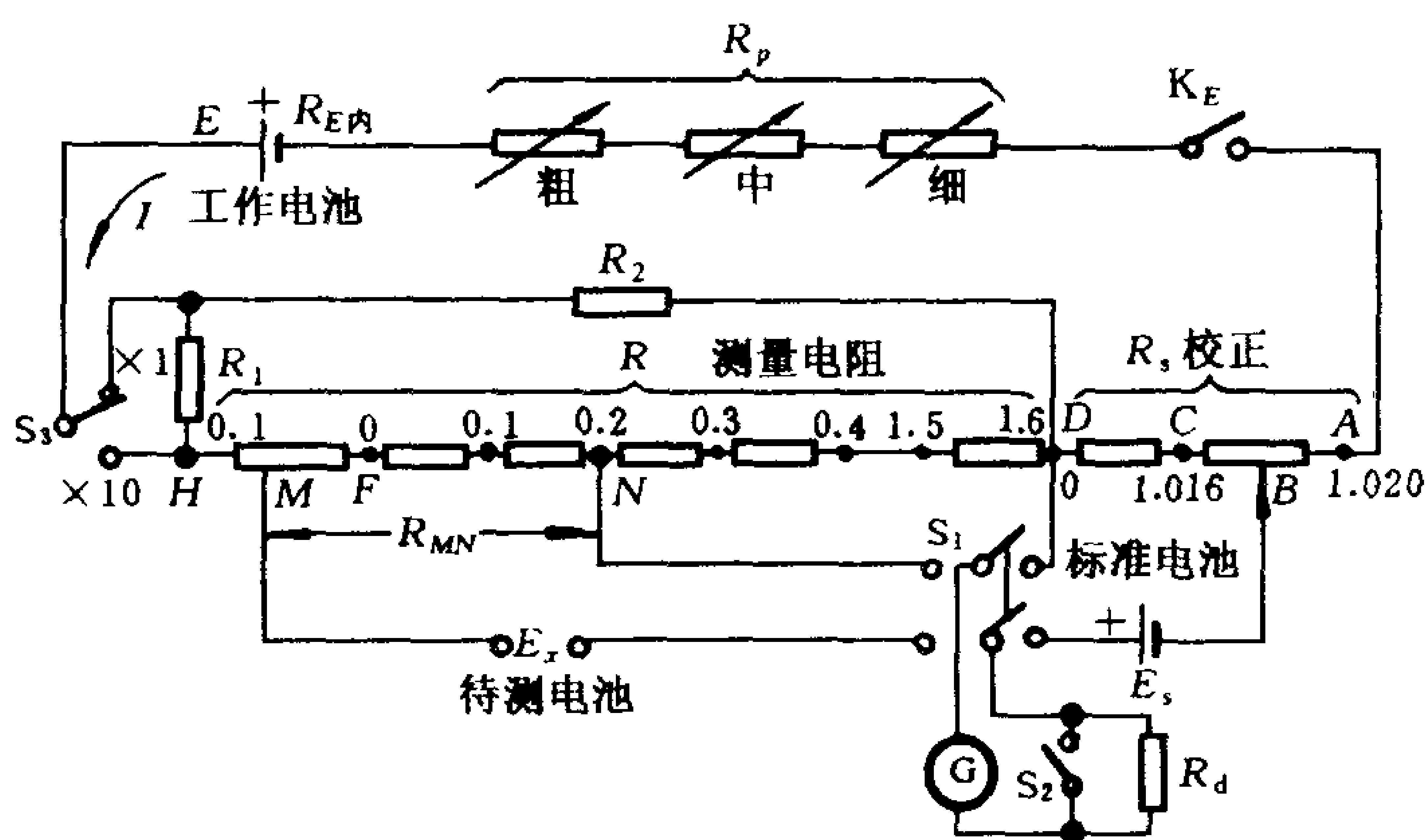


图 8－10 箱式电势差计线路图

示值和测量温度下标准电池的电动势一致，以便校准工作电流．调节工作电流的限流电阻 R_p 分为粗、中、细三级．选择开关 K_2 有五个位置，若 K_2 指在“标准”位置时，检流计接入校准电路，用以校准工作电流；K_2 指在“未知 1”或“未知 2”时，检流计接入被测电路，可分别测量联接在“未知 1”或“未知 2”上的电动势 E_x，不测量时应将 K_2 转到“断”的位置．电键按钮有三个，按“粗”则接通 R_d，电流计灵敏度较低，按“细”则接通 S_2，电流计灵敏度较高，按“短路”则摆动的电流计指针或光指标可立即停止．

实验九　低电阻的测量

目的

1. 掌握用伏安法测量低电阻的方法；
2. 学习双电桥测量低电阻的原理和方法.

仪器和用具

电阻箱、安培计、毫伏计、标准电阻、检流计、螺旋测微计、待测低电阻、滑线变阻器、开关及导线.

原理

1. 伏安法测低电阻的困难与处理

伏安法测中等阻值的电阻是很容易的，但在测低电阻 R_x 时将遇到困难，如图 9－1 所示，(a)是伏安法的一般电路图，(b)是将 R_x 两侧的接触电阻、导线电阻以等效电阻 R'_1、R'_2、R'_3、R'_4 表示的电路图. 由于电压表 V 的内阻较大，串接小电阻 R'_1、R'_4 对其测量影响不大，而 R'_2、R'_3 串接到被测低电阻 R_x 后，使被测电阻成为 $(R'_2+R_x+R'_3)$其中 R'_2 和 R'_3 和 R_x 相比是不可不计的，有时甚至超过 R_x，因此如图 9－1 的电路不能用以测量低电阻 R_x.

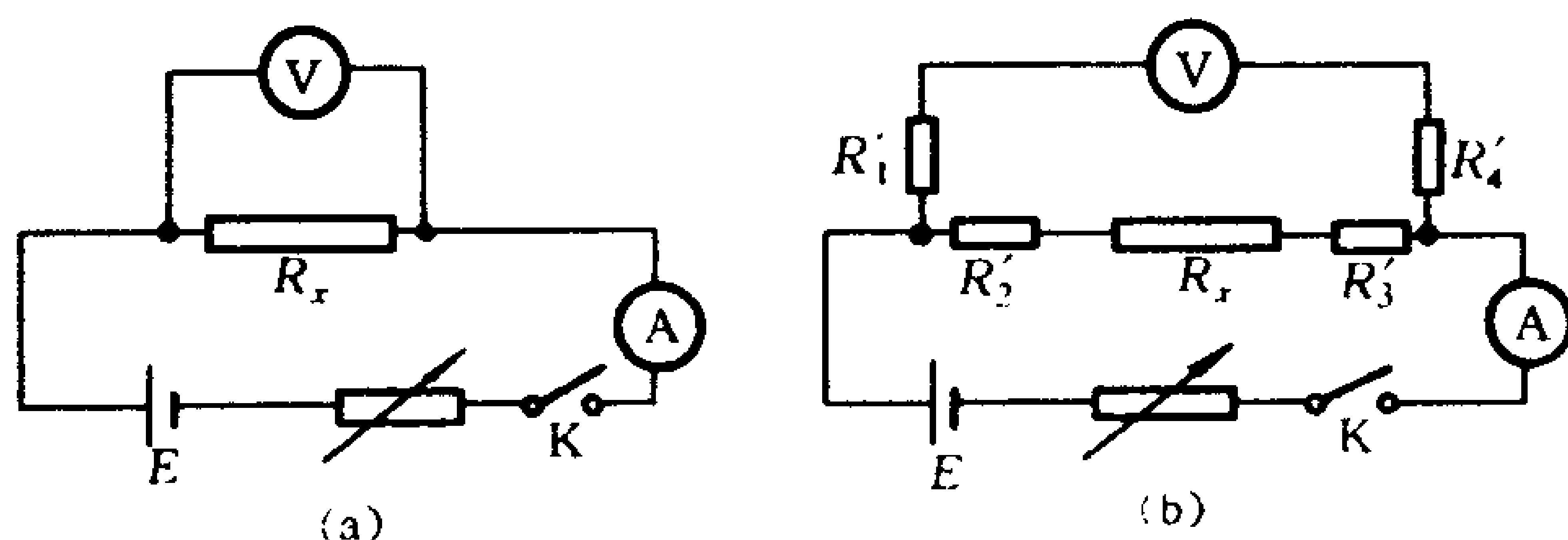


图 9－1

解决上述测量的困难，在于消除 R'_2、R'_3 的影响，图 9－2 的电路可以达到这个目的. 它是将低阻 R_x 两侧的接点分为两个电流接点（cc）和两个电压接点（pp），这样电压表测量的是长 l 的一段低电阻（其中不包括 R'_2 和 R'_3）两端的电压. 这样的四接点测量电路使低电阻测量成为可能.

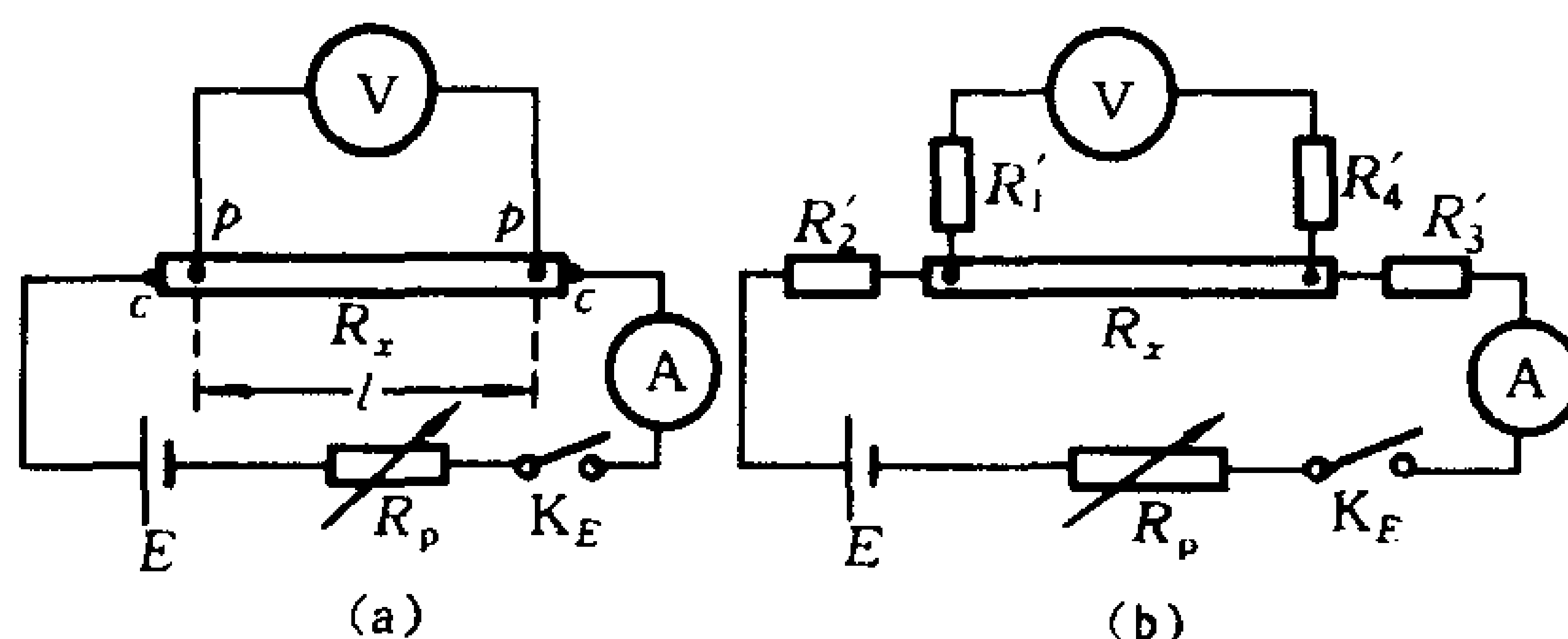


图 9－2

（1）电压的测量

设 $R_x=0.002\ \Omega$，则当电流 $I=1.5$ A 时，$U_l=0.003$ V，即 3 mV，因此测低电阻时，要用毫伏表测电压. 为了减少毫伏表内阻不够大的影响，可改用数字电压表或电势差计去测量.

（2）电流的测量

如用安培计测量图 9－2 电路中的电流，当选用量限 2 A，0.5 级安培计时，对于 1.5 A 的电流可能使电流 I 的测量的相对误差达到 0.67%，即低电阻的测量误差将超过 0.67%. 如要提高低电阻测量的精密度，就要改用如图 9－3 间接测量电流的方法，即精确测量串联的标准电阻 R_s 两端的电压 U_s，由 $I=\dfrac{U_s}{R_s}$ 去求 I 值，

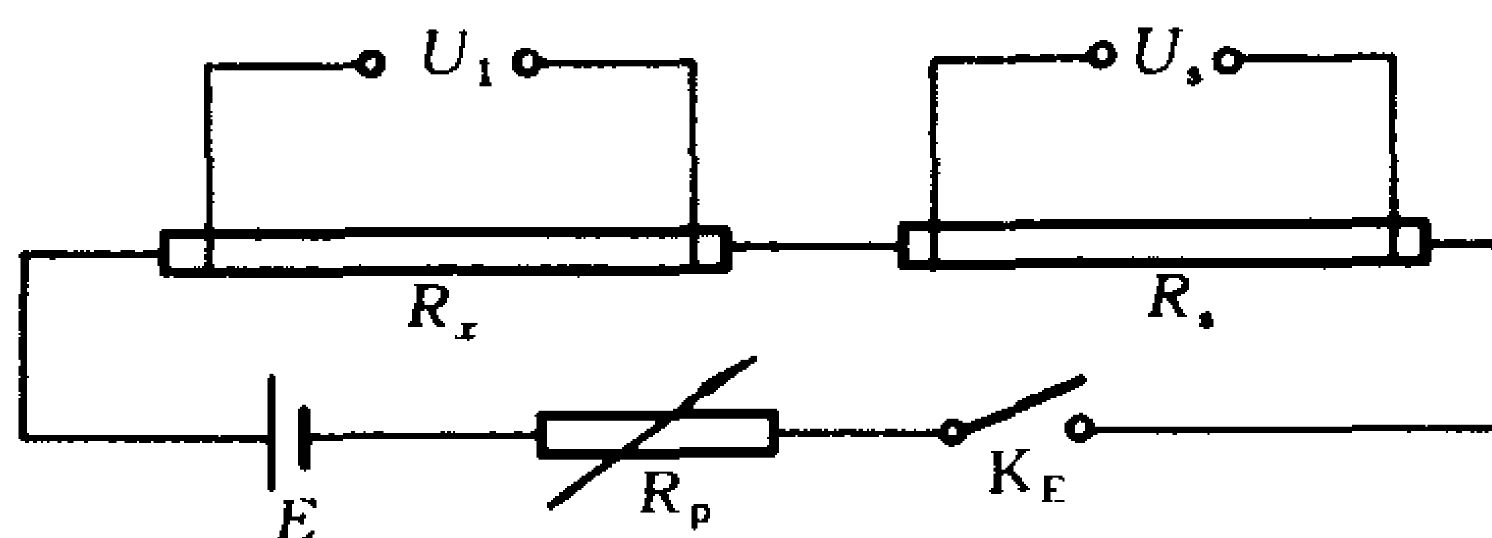


图 9－3

由于 U_s 可以设法测得很精确，所以可提高电流 I 的精确度.

2. 测低电阻的开尔文(Kelvin)双电桥的原理

双电桥测低电阻，就是将未知低电阻 R_x 和已知的标准低电阻 R_s 相比较，在联结电路时均采用四接点接线，比较电压的电路，如图 9-4 所示，R'_1、R'_2、R'_3 表示接触电阻和导线电阻，比较 R_x 和 R_s 两端的电压时，用通过两个分压电路 adc 和 b_1bb_2 去比较 b、d 二点的电势，由于 R_1、R_2、R_3、R_4 的电阻值较大，其两端的接触电阻和导线电阻可以不计. 当 R_1、R_2、R_3 和 R_4 取某一值时可使 $I_G=0$，即

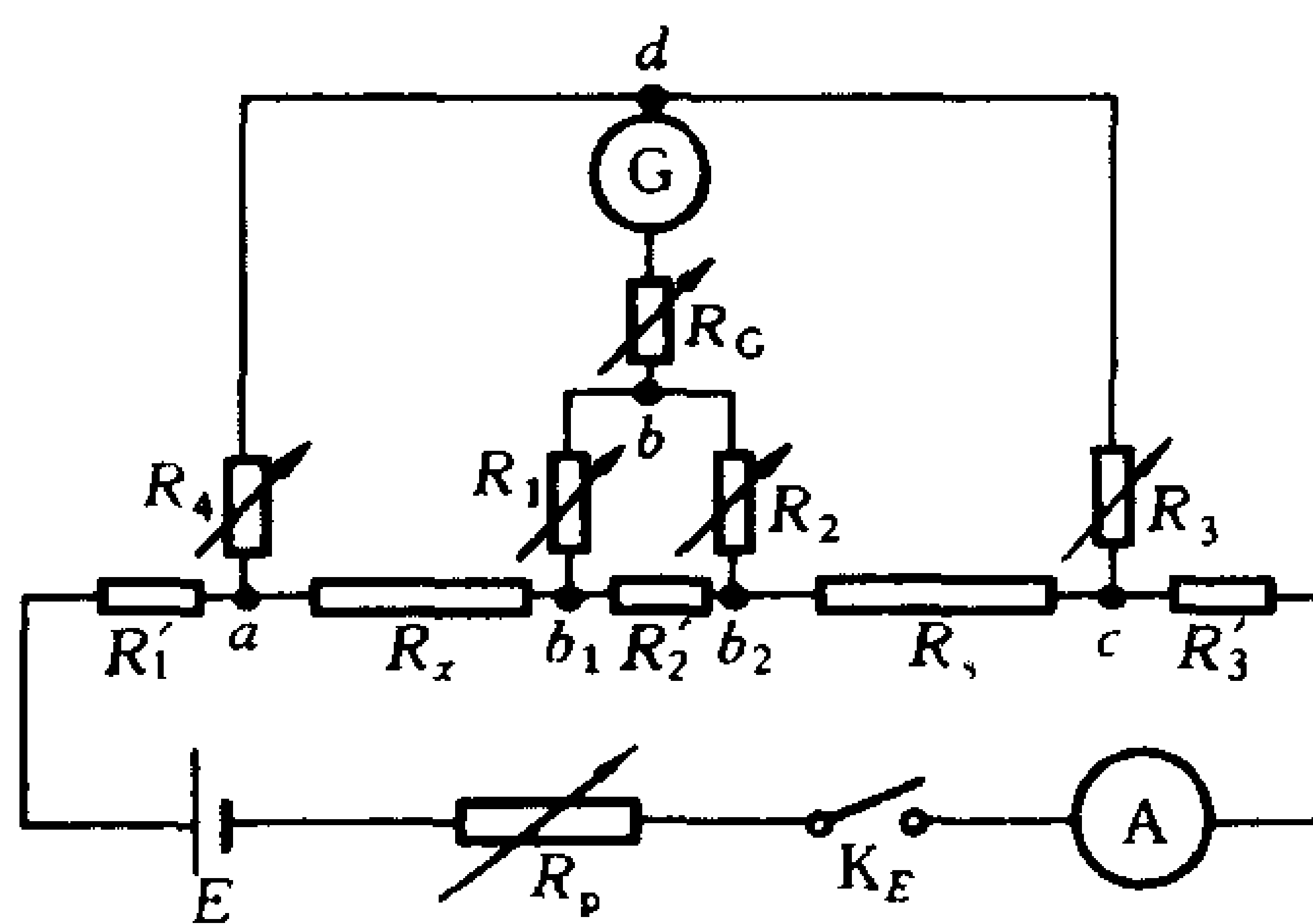


图 9-4

$$U_{bc}=U_{dc} \tag{9-1}$$

由于

$$U_{bc}=U_{b_1b_2}\frac{R_2}{R_1+R_2}+U_{b_2c}\approx I_{R'_2}\left(\frac{R'_2R_2}{R_1+R_2}+R_s\right) \tag{9-2}$$

$$U_{dc}=U_{ac}\frac{R_3}{R_3+R_4}\approx I_{R_s}(R_x+R'_2+R_s)\frac{R_3}{R_3+R_4} \tag{9-3}$$

由于 $R'_2\ll R_1$ 或 $R'_2\ll R_2$，上二式中取 $I_{R'_2}\approx I_{R_s}=I$，代入式(9-1)消去 I 得

$$\frac{R_3(R_x+R'_2+R_s)}{R_3+R_4}=\frac{R'_2R_2}{R_1+R_2}+R_s \tag{9-4}$$

整理上式改写成为

$$R_x = R_s \frac{R_4}{R_3} + R'_2 \left(\frac{1 + \frac{R_4}{R_3}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} - 1 \right) \tag{9-5}$$

从上式可以看出,当$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$时,式中右侧括号中的值等于零,因而不好处理的接触电阻及导线电阻 R'_2 的影响被消除,结果

$$R_x = \frac{R_4}{R_3} R_s \tag{9-6}$$

即在满足 $U_{bc} = U_{dc}$($I_G = 0$)和$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$的条件下,可用上式算出未知低电阻值 R_x.

实验内容

1. 用伏安法测粗铜线上长为 l(50 cm 以上)一段的电阻

参照图 9-2 或图 9-3,用实验室提供的仪器组织测量. 为了增大低电阻两端的电压差,电路的电流要适当取大一些(比如 1~2 A),实际上取多大合适,还要看被测金属线截面积的大小. 要注意电流过大,被测金属线的温度将升高,电阻值要变化. 改变几次 l 值进行测量.

2. 用组装双电桥测上述金属线的电阻

参照图 9-5 的电路,用 4 只电阻箱,一个标准低电阻 R_s,待测低电阻 R_x 和检流计等仪器组成一开尔文双电桥,R_s、R_x 均用四接点联

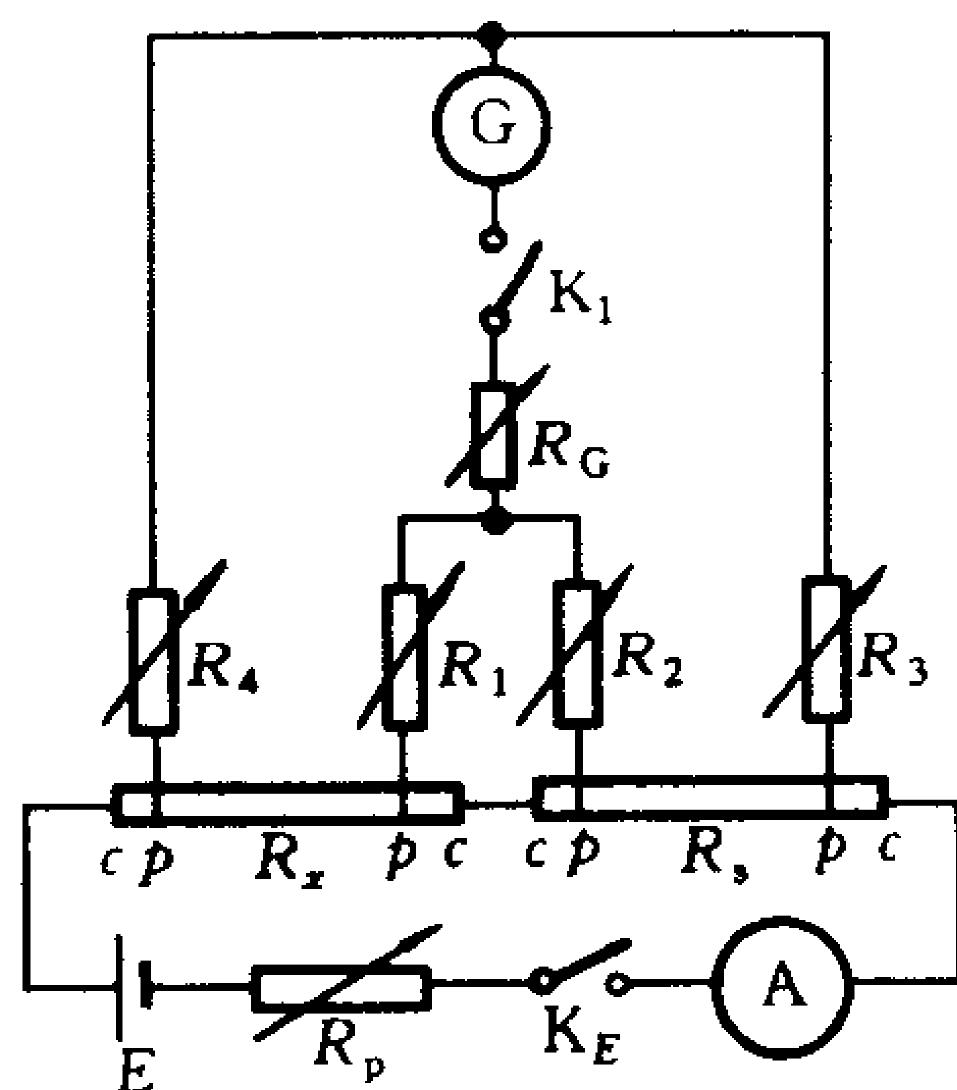


图 9-5

线．联接电路最好用三种颜色的导线，这对联线、检查都方便．

开始测量时，R_G 和 R_p 都取大一些的阻值，这容易调节电桥的平衡，R_1、R_2、R_3、R_4 可取同一值（例如 2 000 Ω）．操作时根据检流计的偏转，改变$\frac{R_1}{R_2}$之值并保持$\frac{R_4}{R_3}=\frac{R_1}{R_2}$，逐渐使电桥平衡．每次调节时，要先断开电源开关 K_E，调节后并确认无误时，再闭合 K_E．（为什么？）

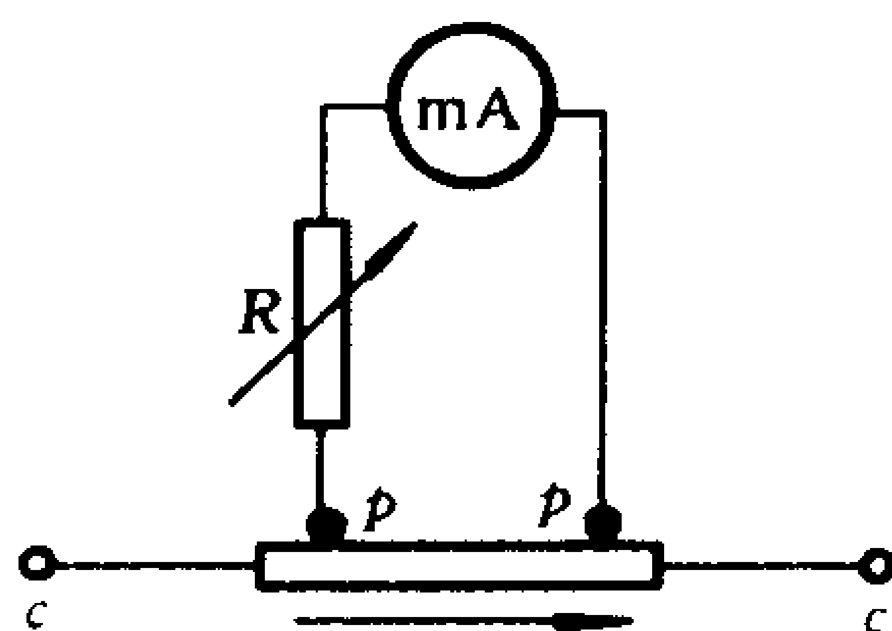


图 9－6　安培计中的分流器

当粗调平衡后，减小 R_G 和 R_p 再细调平衡．

改变几次 l 值，进行反复测量．

3．用伏安法测同一铜线的电阻．

4．测量金属线直径 d，用电阻率 $\rho=\frac{\pi d^2}{4l}R_x$ 求各组(l, R_x)的 ρ 值，再求 $\bar{\rho}$ 及 $u(\rho)$．比较用伏安法、双电桥法测量的结果．

5．用伏安法测量导线与接线柱间的接触电阻．测量安排由自己设计．

预习思考题

1．被测低电阻为何要有 4 个端钮？

2．双电桥测电阻值的基本原理是什么？

3．双电桥平衡的条件是什么？为何 R_2 和 R_3 或者 R_1 和 R_4 要同轴调节？

4．为什么要测量双电桥的灵敏度？怎样调节它？

5．怎样检验测量到的 R_x 值有否因电阻箱不准而造成的系统误差？怎样消除它的影响？

复习思考题

1．调节用电阻箱组装的双电桥平衡时应注意什么？

2. 产品安培计的分流电阻如图9－6所示. 图中可变电阻 R 有什么作用? 能否改变低值电阻?

3. 怎样测量两根导线连接点的接触电阻?

4. 如果低电阻的电势端钮与电流端钮搞错会产生什么现象? 为什么?

5. 电阻箱组装的双电桥与箱式双电桥有什么区别? 怎样调节它们的平衡?

6. 在双电桥线路中,如果待测电阻 R_x 的 p_1 与 p_2 相互交换而错接,问电桥能否平衡? 会产生什么现象?

实验十　万用电表的制作与定标

目的

1. 掌握万用电表的基本原理和设计方法；
2. 学习万用电表的组装与定标.

仪器和用具

表头(50 μA 或 100 μA)[①],直流电压表,直流电流表,电阻箱,直流电源,交流电源,交流电压表,插件板,各种电阻[②],万用表,导线等.

原理

1. 万用电表的构成

万用电表是一种多功能、多量程的电学仪表,它可在几个不同量程测量直流电流、直流和交流电压、电阻,有的万用表还增加检测晶体管特性等功能,由于它的功能较多,在实验调试、故障检查工作中使用非常方便.

常用的万用表是以一块磁电型电流计(微安计)为核心组装而成的;此外数字显示的数字式万用表现在也逐渐增多. 在此实验中是练习以微安计为显示器的万用表的设计与组装,并且只限于直流电流、直流电压、电阻和交流电压 4 种功能.

上述 4 种功能如果分开孤立地设计则很容易. 如图 10－1 所示,设计直流电流计就是计算分流电阻 R 之值;直流电压计就是计算串联电阻 R'之值;欧姆计就是直流电压计加一直流电源,当

---

① 应在课前了解实验室提供的表头的具体规格,以便预习时进行计算.

② 应准备一些可变电阻(电位器).

在此欧姆计两端 A、B 接入一电阻 R_x 时，表头指针将偏转，而且偏转大小和 R_x 有关，即从表头指针偏转的大小可以测量 R_x 值．交流电压计是直流电压计加入整流电路构成．

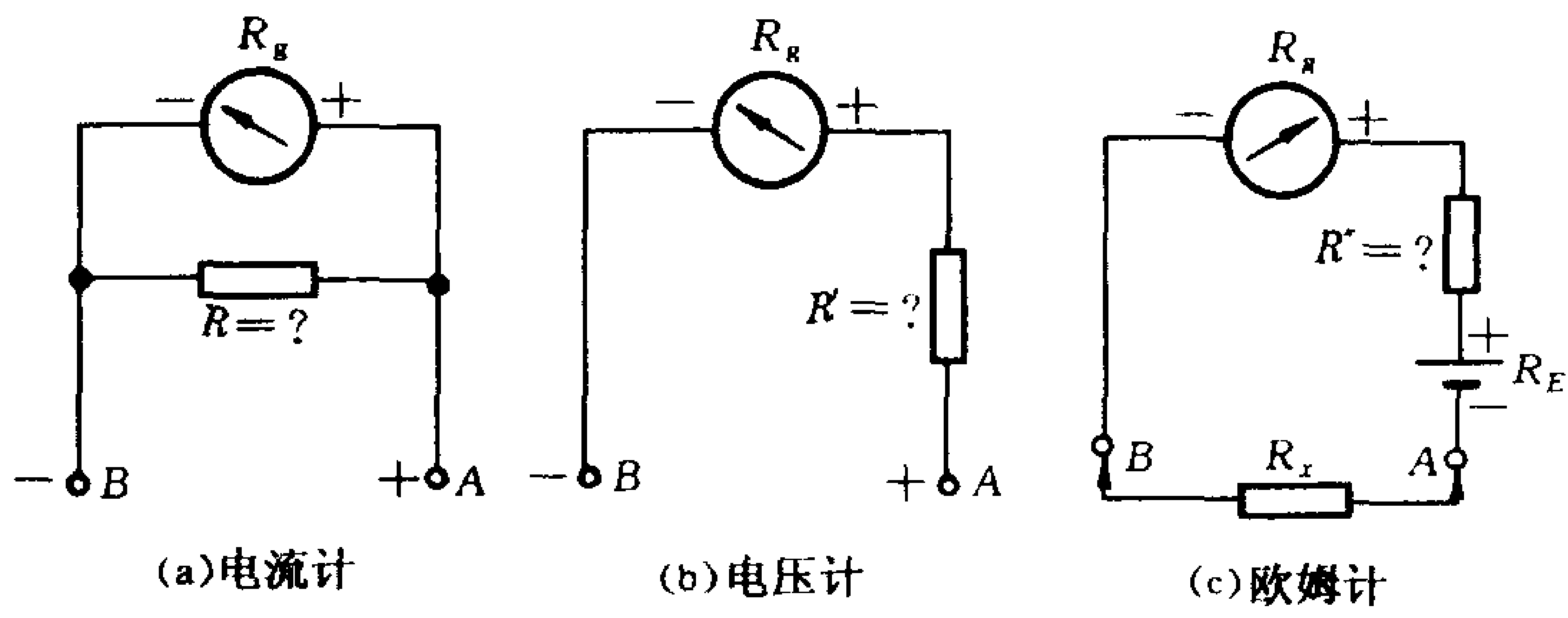


图 10－1

实用万用电表不是孤立的各功能电路的简单组合，而是从减少元件简化电路的角度设计的综合电路．图10－2的电路是参照

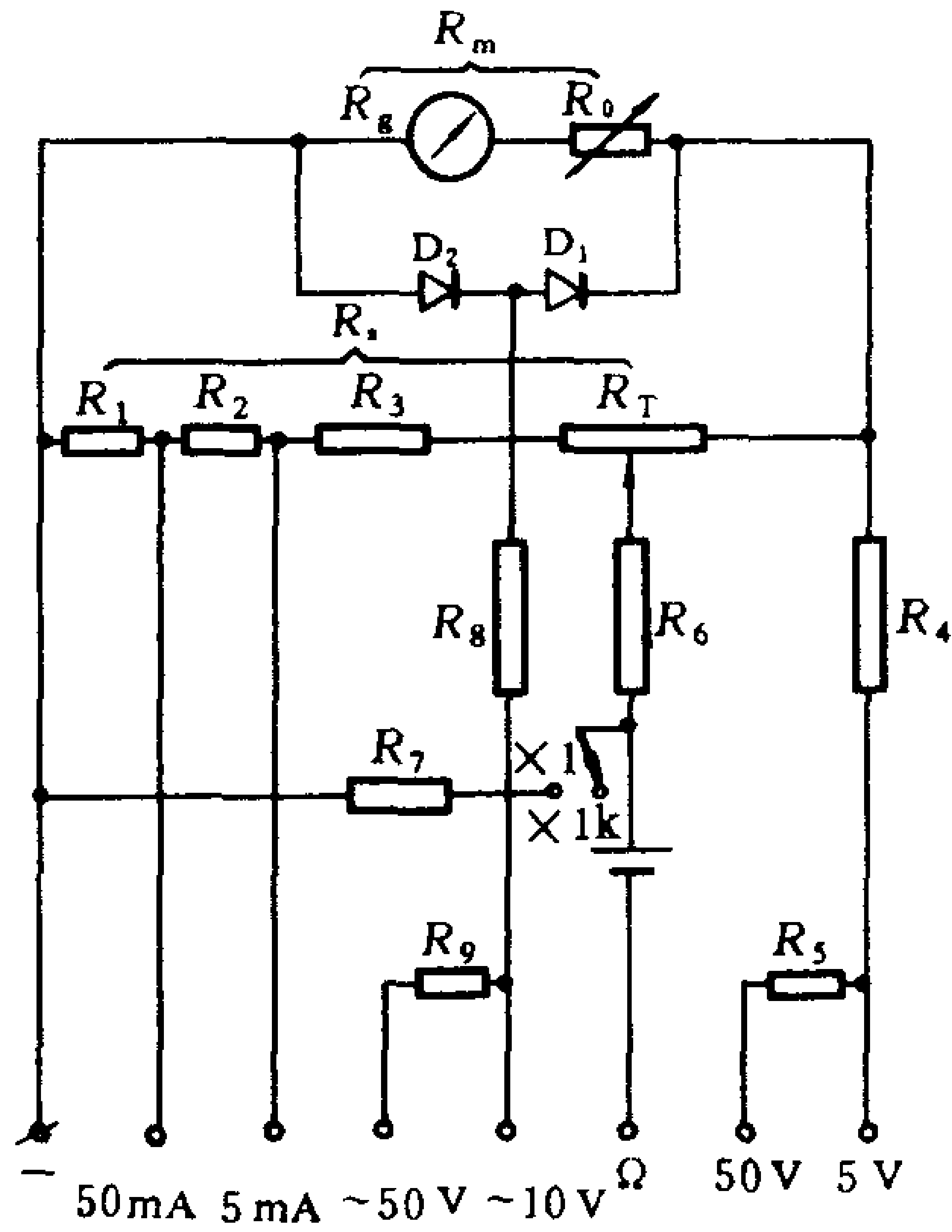


图 10－2

MF－30 型万用表电路的简化电路，在此实验中就以此电路为准去设计. 为了设计时计算的便利，设定电流计内阻 R_g 和串联电阻 R_0 之和为 3 kΩ，并用 R_m 表示，即

$$R_m = R_g + R_0 = 3\ \text{k}\Omega$$

又设定 R_1、R_2、R_3、R_T 之和为 3 kΩ，用 R_s 表示，即

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + R_T = 3\ \text{k}\Omega$$

2. 直流电流挡的设计

设图 10－2 中表头的量限为 I_0（常为 50 μA 或 100 μA），现在设计将量限扩大为 5 mA 和 50 mA. 从图 10－2 中摘出与这二量限有关的电路，如图 10－3 所示. 从中可以看出，对于量限 50 mA 的设计，在于算出电阻 R_1 之值，其电路又可改绘成为如图 10－4 的电路图，这时通过表头的电流如为满量程 I_0，则另一支路，即通过 R_1 的电流为 0.05 A－I_0，于是

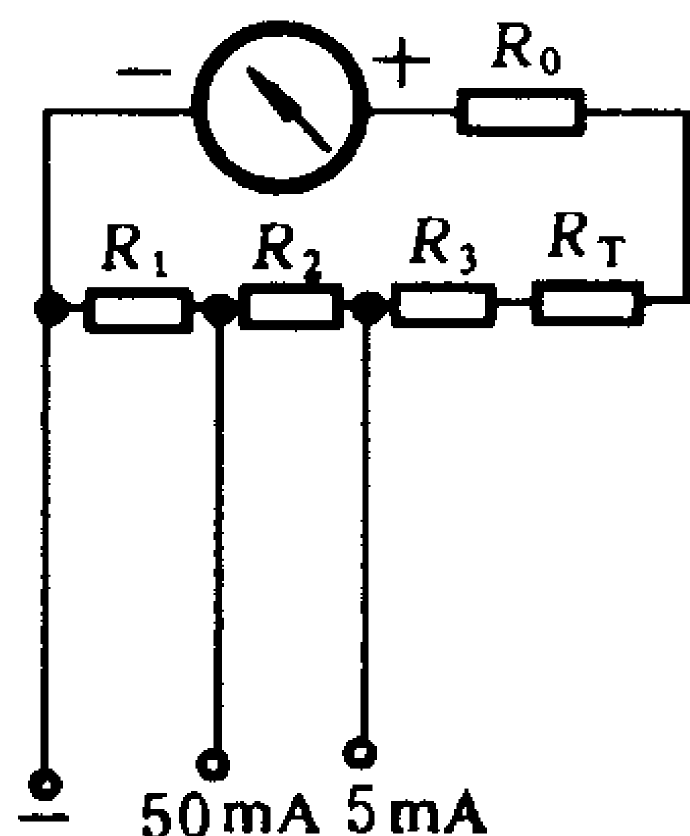


图 10－3

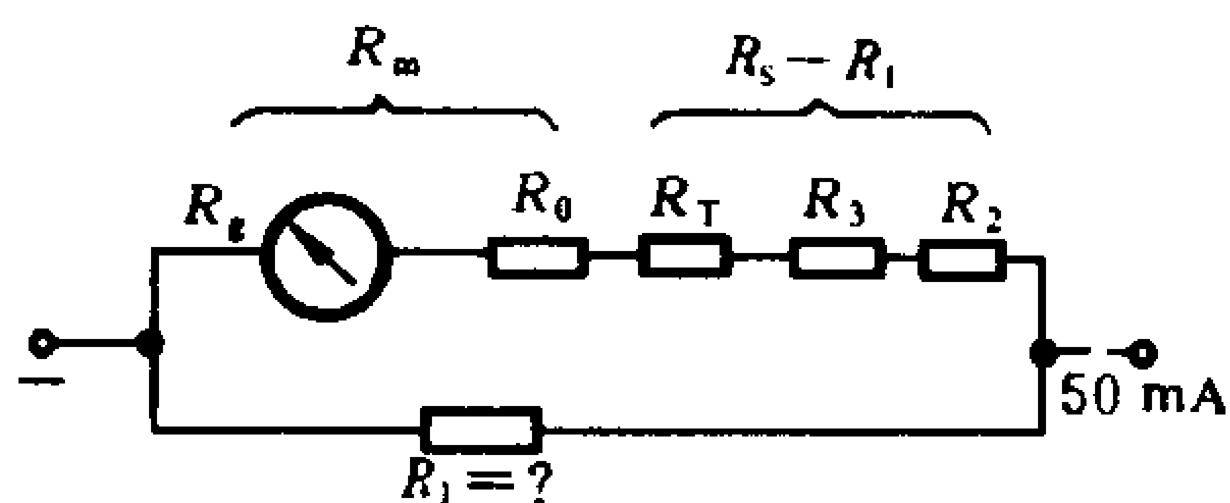


图 10－4

$$I_0(R_m + R_s - R_1) = (0.05 - I_0)R_1$$

即
$$R_1 = \frac{I_0(R_m + R_s)}{0.05} \tag{10-1}$$

设计 5 mA 挡可有类似图 10－4 的电路图 10－5，参照对 R_1 的计算可求出($R_1 + R_2$)，由于 R_1 为已知所以可求得 R_2.

3. 直流电压挡的设计

从图10－2中，摘出测量电压的电路，如图10－6所示，由于

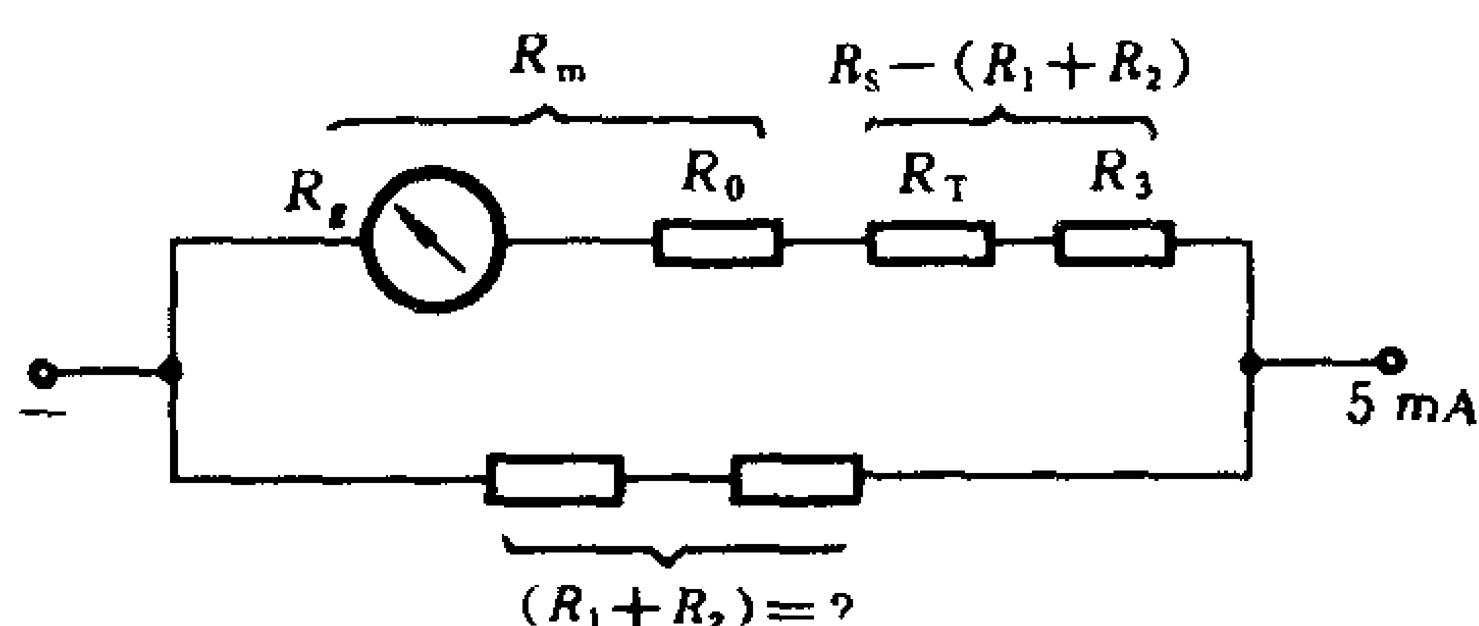


图 10－5

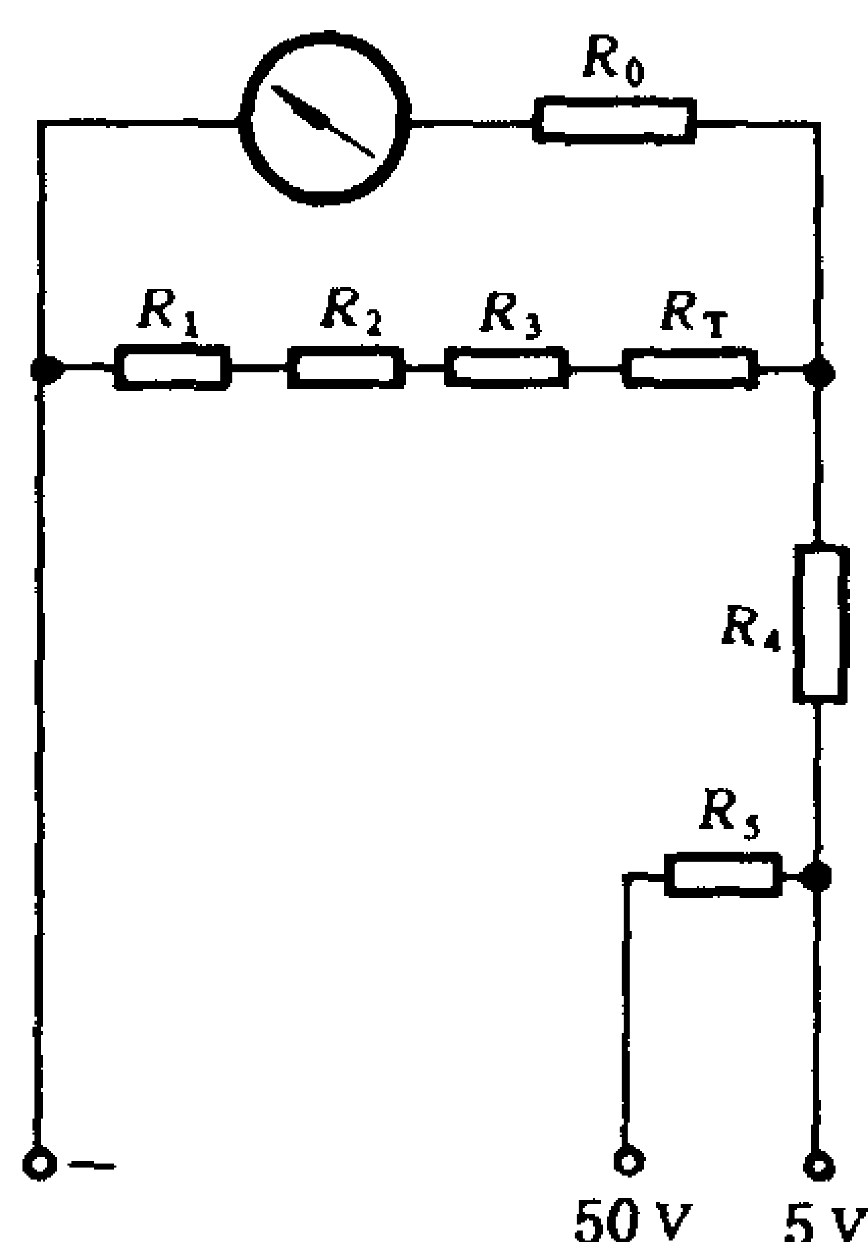


图 10－6

R_m、R_s 已设定，因而在此是计算 R_4 和 R_5 之值．对 5 V 档可绘出图 10－7 的电路．当表头中电流为满量程 I_0 时，另一分支的电流也应为 I_0（因为 $R_s=R_m$），即总电流为 $2I_0$，因为已设定 $R_s=R_m=3\ \mathrm{k\Omega}$，两端电压为 5 V，所以可算出唯一的未知量 R_4 之值，同时可求出伏特计的每伏欧姆数 $\mathscr{R}$（＝内阻/伏特计量限）．

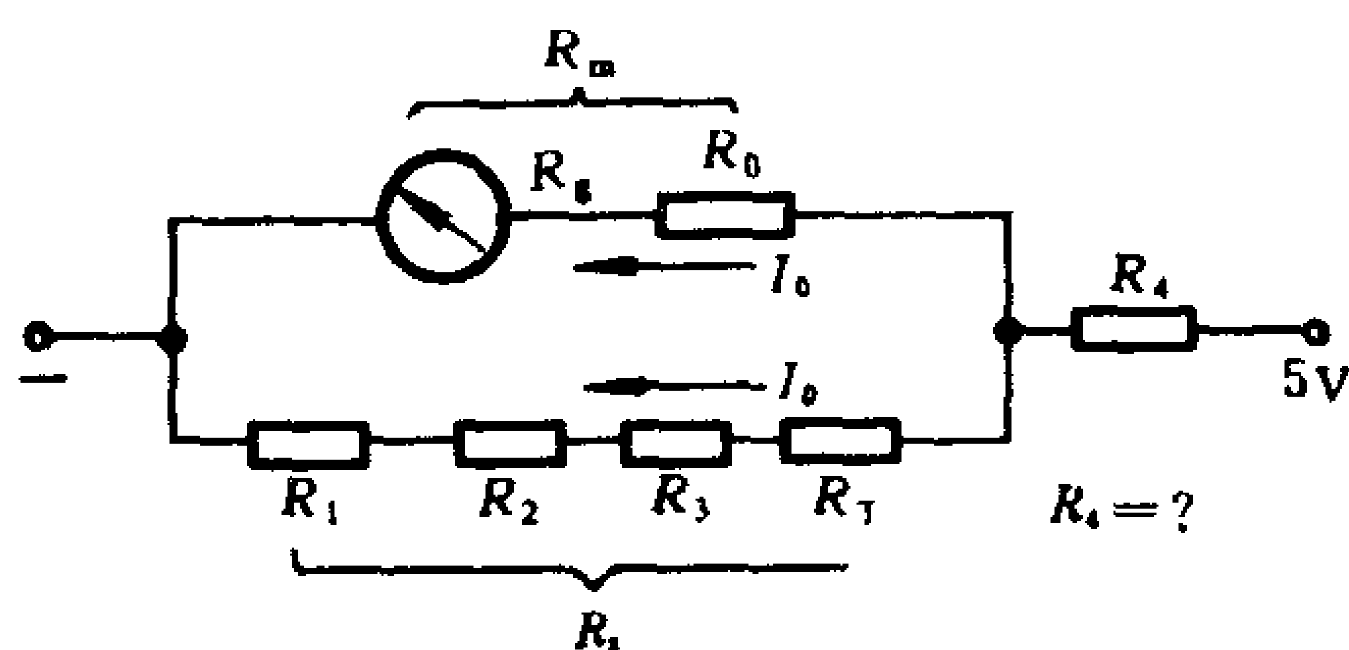


图 10－7

设计直流电压 50 V 挡是计算 R_5，可利用已知的 R_4 和 $\mathscr{R}$ 求出。

4．欧姆挡的设计

此设计稍许复杂，以下分几步讨论．

（1）欧姆表的不均匀分度与中心阻值

图 10－1(c)为简单的欧姆表电路图，当 $R_x=0$ 时，调 R'' 使表头指针在满刻度 I_0，此时内阻设为 $R_内$，如果这时加入电阻值为 R_x 的电阻，则电流

$$I = E/(R_内 + R_x)$$

设 $E=1.5$ V，$I_0=50$ μA，则 $R_内=30$ kΩ，这时 R_x 与 I 的关系可按上式算出为

R_x/kΩ	∞	270	120	70	45	30	20	12.9	7.5	3.3	0
I/μA	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

上表显示欧姆表度盘的分度将是非常不均匀的，在 I 接近零时，R_x 的变化对 I 的影响较小，度盘上刻线比较密，分度值也较大．当 $I=\frac{I_0}{2}$时，可知 $R_x=R_内$，由于此时指针刚好位于度盘中心，因而将此阻值称为中心阻值(或欧姆中心)，即欧姆表的中心阻值 R_K 等于欧姆表的内阻．显然中心阻值 R_K 越小，欧姆表度盘右半的分度值就越小，由于使用欧姆表测量电阻时主要用度盘的右半和中心附近，因而中心阻值对于欧姆表就类似于电流表的量限．

(2) 调零电阻 R_T 与中心阻值 R_K

图 10－8 是从图 10－2 中摘出的电阻测量电路(×1 k 档)．

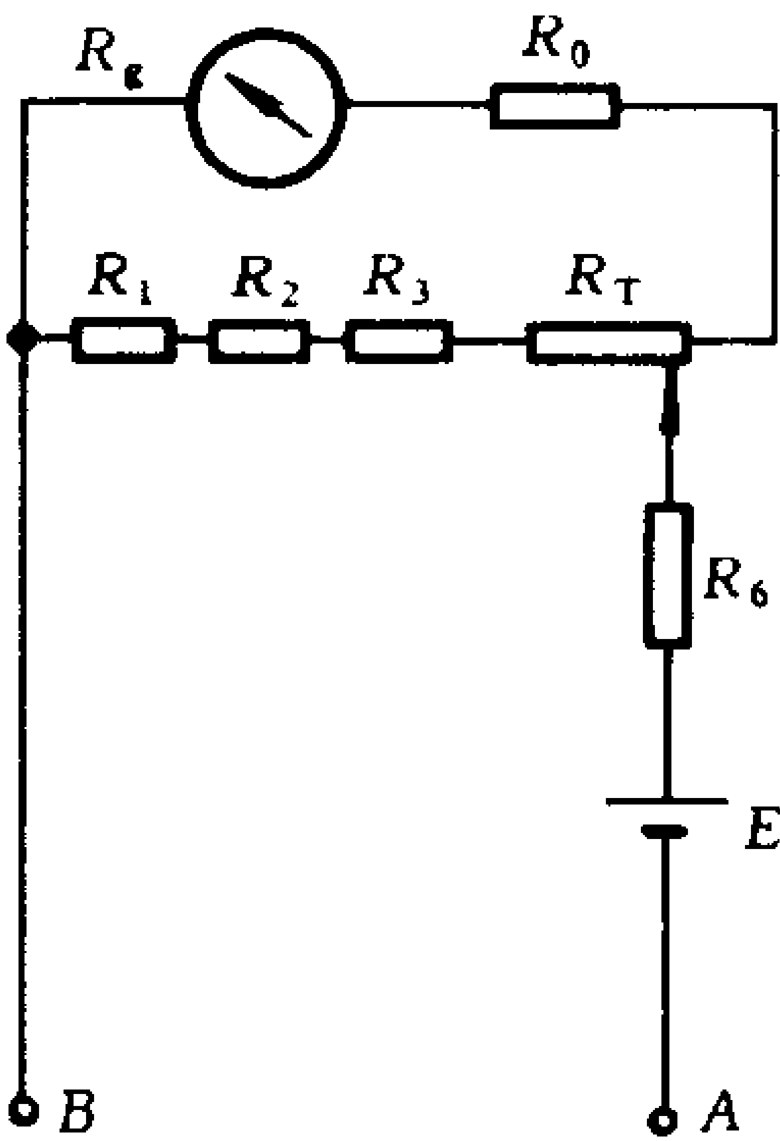


图 10－8

欧姆表中的电源为一节干电池，其电动势在 1.5 V 附近，新的可能接近 1.65 V，旧的要低一些，在此设计中取电压最低值为 1.2 V．为了适应电池电压变化时，均能在 $R_x=0$(A、B 短接)时表头指针指向满刻度，设置了分压电阻 R_T，称为调零电阻．显然电池电动势低时，R_T 的滑动端应向图的右侧移动，电

池电动势高时则向左侧移动.

为了计算中心阻值方便,电池电压取最小值 1.2 V,R_T 的滑动端移到最右侧,由于 $R_m = R_s$,所以二支路的电流相等,$R_x = 0$ 时回路电流为$2I_0$,因此可求出中心阻值 R_K

$$R_K = \frac{1.2\ \text{V}}{2I_0} \tag{10-2}$$

又 R_m 与 R_s 并联阻值为 1.5 kΩ,所以

$$R_6 = R_K - 1.5 \tag{10-3}$$

(3) 调零电阻 R_T 及 R_3 阻值的计算

取电池电压最高值为 1.65 V,R_T 的滑动端移到最左侧(图 10-9),$R_x = 0$ 时,回路电流 I 等于

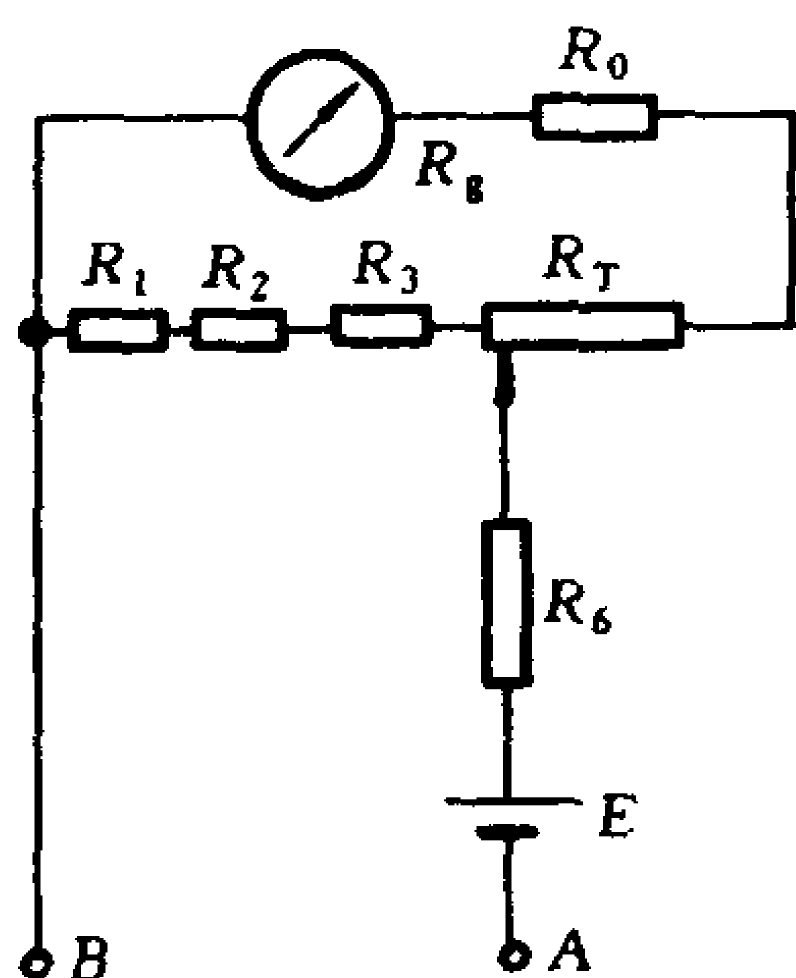


图 10-9

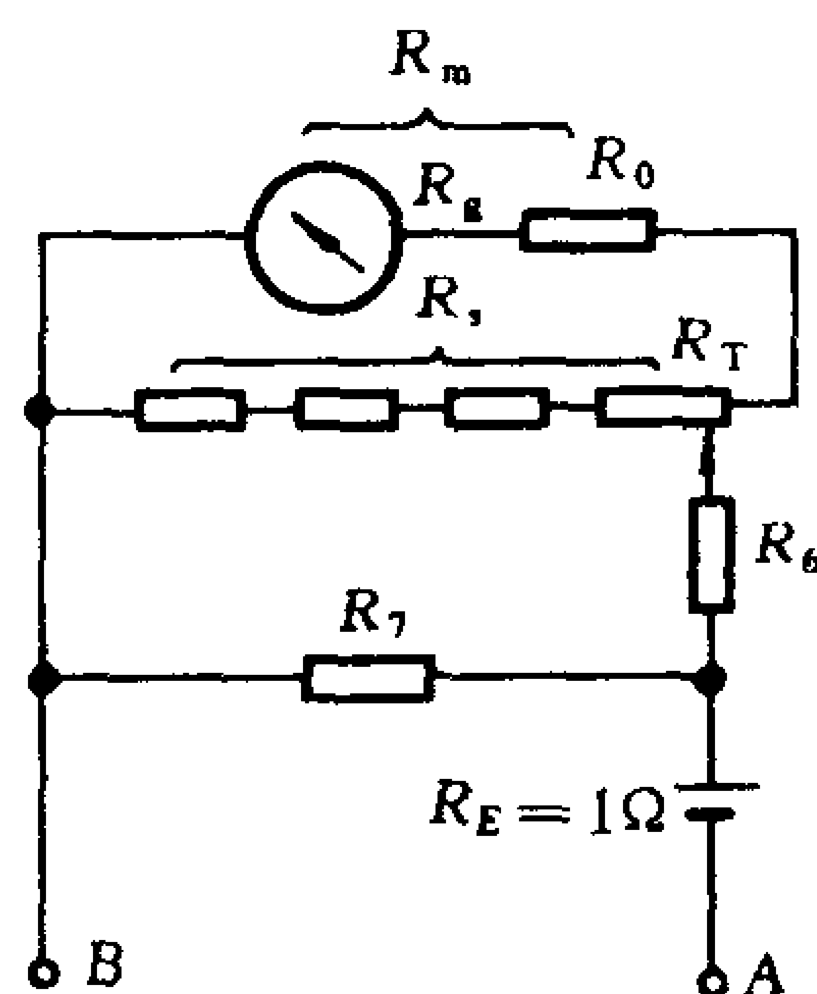


图 10-10

$$I = \frac{1.65\ \text{V}^{①}}{R_K} \tag{10-4}$$

则

$$I_0(R_m + R_T) = \left(\frac{1.65}{R_K} - I_0\right) \times (R_s - R_T)$$

---

① 严格讲此时 R_K 值不同于前述值,在此仍近似认为相同.

因而

$$R_T = \frac{1.65R_s - I_0(R_s + R_m)R_K}{1.65} \qquad (10-5)$$

又因为 R_1、R_2 为已知，所以从 $R_1 + R_2 + R_3 + R_T = 3\ k\Omega$ 可以求出 R_3 之值.

(4) ×1 挡电路的中心阻值及 R_7 阻值的计算

×1 挡的中心阻值 R'_K 取为 $R_K/1\ 000$，即内阻减小，图(10-10)是用增加分路去减小内阻，设计工作是计算 R_7 阻值。

由于 R_m 与 R_s 的并联电阻为 1 500 Ω，R_6 已求出，电池内阻 R_E 取 1 Ω，同时电路的总电阻 R'_K 也已确定，唯一未知的是 R_7，很容易从这些已知值计算出电阻 R_7 的阻值.

5. 交流电压挡的设计

从图 10-2 中摘出测量交流电压的电路如图 10-11，这是半波整流电路，其中 D_2 为串联于表头的二极管，D_1 是为保护 D_2 在电压反向时不被击穿而设置的. 当 AB 端接入交流电压，则在 A 为高电势时，电流从 A 流入，经过 D_2、表头到 B；在 B 为高电势时，电流由 B 流入，经过 D_1 到 A，即不经过表头，因而是半波整流.

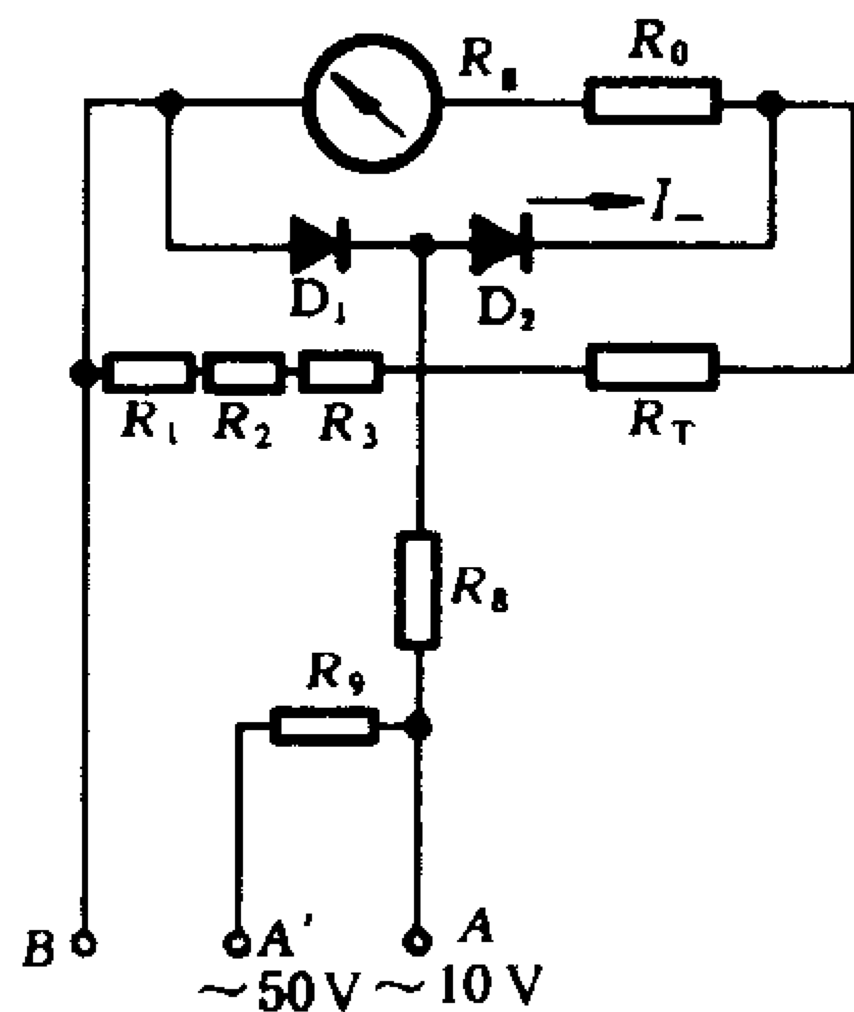


图 10-11

计算时要将输入端的交流电流值 $I_\sim$ 按总效率换算成输出端输出的直流电流值 I_-，即

$$I_- = I_\sim \times \eta \qquad (10-6)$$

式中 η 为整流总效率，η 的组成为

$$\eta = p \times \kappa \times \eta_0$$

其中 p 是整流因数(全波为 1，半波为 0.5)，κ 为波纹系数，是交流

有效值与平均值的转换系数，其值为0.900 3[①]，η_0为整流元件的整流效率，因元件而异，在此暂取98%，则

$$\text{半波整流效率}\ \eta_{半}=0.5\times0.900\,3\times0.98=0.441$$

由于表头量限为 I_0，二支路电阻又相等($R_m=R_s$)，所以回路的直流部分电流 $I_-=2I_0$，因而输入端的交流电流 $I_\sim=I_-/0.441=2I_0/0.441$，则内阻 $R_内$ 为

$$R_内=\frac{U_{max}}{I_\sim}=\frac{U_{max}}{2I_0}\times0.441 \qquad (10-7)$$

式中 U_{max}为设计交流电压表的量限，而 $R_内$ 由R_m 与 R_s 的并联电阻 $R_并$、二极管 D_2 的顺向电阻 R_d(取 1 kΩ)和 R_8(或 R_8+R_9)组成，即

$$R_内=R_并+R_d+R_8(对\ 10\tilde{V}\ 挡)$$

因而可算出

$$R_8=\frac{10}{2I_0}\times0.441-R_并-R_d(对\ 10\tilde{V}\ 挡) \qquad (10-8)$$

同样也可算出 $50\tilde{V}$ 挡要增加的 R_9 的阻值.

实验内容

1. 要求将一微安表头(量限为 I_0)改装成如下规格的万用电表(参照图 10-2 的电路)：

直流电流——5 mA,50 mA

直流电压——5 V,50 V

交流电压——10 V,50 V

欧姆——×1 kΩ,×1 Ω

2. 在课前做下述工作

(1)参照图10-2，算出$R_1\sim R_9$及R_T的阻值，为此要先了

① $I=\frac{1}{\pi}\int_0^\pi\sqrt{2}I_c\sin(\omega t)d(\omega t)=0.900\,3I_c$.

解实验室提供的表头的量限 $I_0=?$

(2) 参照测量表头内阻(中学有此实验)的方法,设计将表头和电阻 R_0 的串联电阻调成 3 kΩ.

3. 选择、调节符合上述计算值的电阻. 如果找不到适用的固定电阻,可用可变电阻(电位器)调成所需的阻值.

4. 参照图 10-2 将各元件及表头引线插到插件板上,联好电路.

5. 检验电流、电压各挡

以直流电流表、直流电压表及交流电压表为准去检验,每档检验 2~3 点,检验电路自己设计.

6. 对直流电压 5 V 挡,检查 10~15 点,定出该挡的准确度等级.

7. 检查调零电阻的效果.

8. 以电阻箱为准,测出欧姆挡的定标线,即测出表头指针偏转格数 n 与外电阻 R_x(已知)的关系值,作(n,R_x)图线,检查中心欧姆是否符合设计要求.

9. 评价你的工作.

预习思考题

1. 欧姆表中心阻值如何确定? 要减小或增大中心阻值应如何解决?
2. 为何欧姆表要设调零电阻 R_T,如何去计算它的阻值?
3. 表头内阻如何去测?
4. 交流电流挡的电路中,能否将二极管 D_1 省去?

复习思考题

1. 用万用表 50 mA 挡去测直流 50 V 电压将会产生什么后果? 为什么?
2. 用欧姆表能否测量电源的内阻或灵敏电流计的内阻? 为什么?
3. 能否用直流电压挡去测量电容器充电后两极间的电压? 为什么?
4. 能否用万用表检查一回路中电阻值? 怎样做?

5. 能否用万用表检查一回路中电流值？怎样做？

6. 要用一微安表头改装成每伏欧姆数为 $\mathscr{R} = 30\ \mathrm{k\Omega \cdot V^{-1}}$、量程为 100 V 的电压表，对表头有否要求？试说明之.

7. 为什么用欧姆挡测电阻时，黑表棒的电位高于红表棒的电位？

实验十一　灵敏电流计特性的研究

目的

1. 了解灵敏电流计的工作原理，并观察在过阻尼、欠阻尼及临界阻尼下的三种运动状态；

2. 掌握测定电流计内阻和灵敏度的方法.

仪器和用具

灵敏电流计、直流电阻箱、直流电压表、标准电阻器、直流电源、双刀双掷开关、单刀开关、秒表.

原理

1. 灵敏电流计的构造与灵敏度

灵敏电流计是一种灵敏度较高的磁电式电流表. 它分指针式和光点反射式两种. 指针式电流计的电流灵敏度一般在 $10^5 \sim 10^7$ $\mathrm{div \cdot A^{-1}}$ 左右，光点反射式可达 $10^8 \sim 10^{11}$ $\mathrm{div \cdot A^{-1}}$，常用于精密电磁测量中作指零仪表，也可测定弱电流和低电压.

光点反射式灵敏电流计的构造如图 11－1 所示，其中光源、三个反射镜和标尺的作用相当于指针式电流表的指针. 因为指针越长，针尖指示刻度的分辨力就越高，但指针太长整个动圈的转动惯量便很大，电流计测量电流的响应时间就要增加. 采用光点反射偏转法以及将动圈做得非常狭长，以减小它的转动惯量，这样既解决了指针的“延长”又减少了测量时间，再加上悬丝的扭转系数很小，因而电流灵敏度可大幅度地提高.

当电流计通电以后，动圈在磁场里受到电磁转动力矩因而发生偏转，同时悬丝由于扭转形变而产生反力矩，当它与电磁力矩相抗衡时，动圈就停在某一位置 θ_0 上，即

$$NISB = D\theta_0$$

移项后，

$$\theta_0 = \frac{NISB}{D} = S_i I \tag{11-1}$$

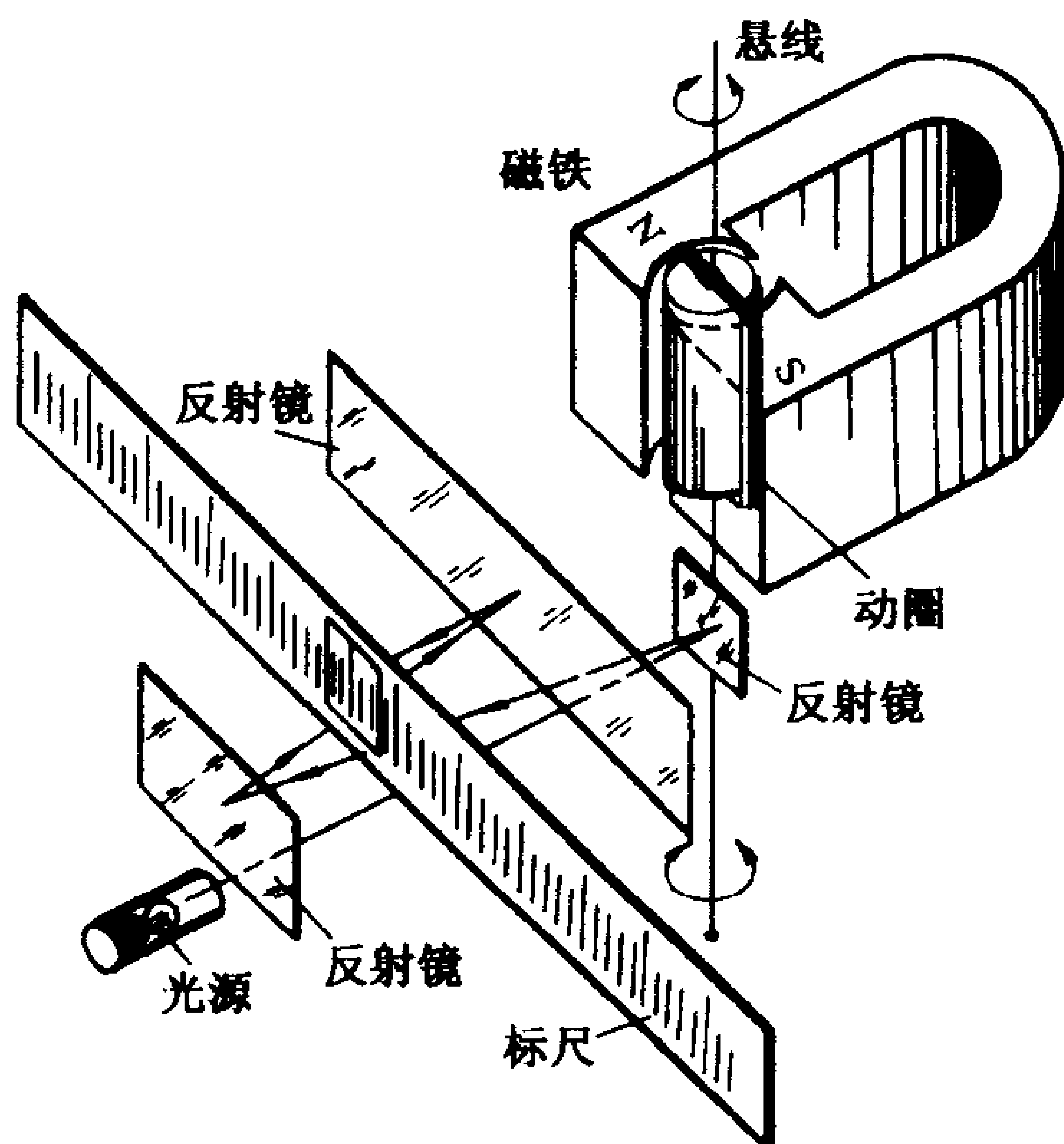


图 11－1　灵敏电流计原理图

式中 N,S 分别为动圈的匝数和面积,I 为流过动圈的电流,B 是动圈所在磁场的磁感应强度,D 是悬丝的扭转系数. $S_i\left(=\frac{NSB}{D}\right)$是与电流计本身构造有关的常量,称为电流计的电流灵敏度,用

$$S_i = \theta_0 / I \tag{11-2}$$

来量度,它的意义是:通过单位电流时,指示电流值的光斑所偏转的分度数. 其单位是分度每安培($\text{div}\cdot\text{A}^{-1}$). 例如 AC15/4 型灵敏电流计的 $S_i = 2\times10^8\ \text{div}\cdot\text{A}^{-1}$,而 AC5/1 型的 $S_i = 3.3\times10^5\ \text{div}\cdot\text{A}^{-1}$. 显然,AC15/4 电流计的灵敏度比 AC5/1 来得高. 有时用 S_i 的倒数,即 $K_i = 1/S_i$ 来描述电表的灵敏程度,并称 K_i 为电流计

常量，它的意义和单位请同学们自己回答.

由式(11－1)可知：θ_0 与 I 成正比，这就是电流计能用线性刻度来量度电流的依据.

2. 灵敏电流计的三种运动状态

当有电流流过电流计时，光斑就发生偏转，然而测量者关心的是偏角随电流变化的响应时间(即电流计停在平衡位置所需要的时间)，响应时间越短，测量值越接近实际值，结果越准确. 而在有些场合下，需要测量的电流强度为时大时小变化的电流平均值，这就要求电流计的响应时间适当增加. 因此，研究和正确使用灵敏电流计，掌握它的运动特性是非常重要的.

我们知道，动圈转动的原因是受到如下几个力矩的作用，即驱动力矩(或称为电磁转动力矩，用 $M_{磁}$ 表示)、弹性扭力矩($M_{弹}$)和电磁阻尼力矩($M_{阻}$). 它们分别用下列式子表示：

$$M_{磁} = NSBI \tag{11-3}$$

$$M_{弹} = -D\theta \tag{11-4}$$

$$M_{阻} = -p\frac{d\theta}{dt} \tag{11-5}$$

式中

$$p = \frac{(NSB)^2}{r_G + R_{外}} \tag{11-6}$$

称为阻力系数，它除了与电流计本身的常量(N、S、B 和电流计内阻 r_G)有关外，还与接在电流计两端的外电路电阻(称为 $R_{外}$)有关. 当电流计两端短接(即 $R_{外}=0$)时，则 $p=\frac{(NSB)^2}{r_G}$ 趋于最大值；开路时，$R_{外}$ 趋于无穷大，因此 $p=0$，也就是不存在电磁阻尼力矩.

根据动力学方程可知

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{磁} + M_{弹} + M_{阻} = NSBI - D\theta - p\frac{d\theta}{dt}$$

移项后得到

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + p\frac{d\theta}{dt} + D\theta = NSBI \tag{11-7}$$

式中 J 是动圈的转动惯量. 上式是二阶线性常系数非齐次微分方程. 根据初始条件

$$\theta(t)\big|_{t=0}=0 \text{ 和 } \left.\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0}=0$$

它的解[1]分下列三种情况:

① 当 $p=2\sqrt{JD}$ 或者 $\frac{p}{2\sqrt{JD}}=\gamma=1$ 时,动圈作临界阻尼的运动,式中 γ 称为电流计的阻尼系数. 其运动规律由下式描述:

$$\theta=\theta_0\left[1-\left(1+\frac{2\pi t}{T_0}\right)\exp\left(-\frac{2\pi t}{T_0}\right)\right] \tag{11-8}$$

上式中

$$\theta_0=\frac{NISB}{D}$$

$$T_0=2\pi\sqrt{\frac{J}{D}} \tag{11-9}$$

T_0 就是电流计自由振荡的周期.

② 当 $p>2\sqrt{JD}$,即 $\gamma>1$ 时,动圈作过阻尼运动,其运动规律可用下式描述:

$$\theta=\theta_0\left\{1-\left[\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2-1}}\operatorname{sh}\left(\frac{2\pi}{T_0}\sqrt{\gamma^2-1}\,t\right)\right.\right.$$

$$\left.\left.+\operatorname{ch}\left(\frac{2\pi}{T_0}\sqrt{\gamma^2-1}\,t\right)\right]\exp\left(-\frac{2\pi t}{T_0}\gamma\right)\right\} \tag{11-10}$$

③ 当 $p<2\sqrt{JD}$,即 $\gamma<1$ 时,动圈作欠阻尼运动,其运动规律由下式描述:

$$\theta=\theta_0\left\{1-\frac{1}{\sqrt{1-\gamma^2}}\sin\left(\frac{2\pi}{T_0}\sqrt{1-\gamma^2}\,t\right.\right.$$

$$\left.\left.+\arcsin\sqrt{1-\gamma^2}\right)\exp\left(-\frac{2\pi t}{T_0}\gamma\right)\right\} \tag{11-11}$$

以上三种运动规律,即 $\theta(t)$ 的表示式中都包含有

---

① 如果将(11-7)式简单变换后就成为二阶线性常系数齐次微分方程,它的求解过程从略.

$$\exp\left(-\frac{2\pi t}{T_0}\gamma\right)$$

因子. 同时,当 $t\to\infty$时,都有 $\theta=\theta_0$ 的结论. 也就是说,不论哪一种运动,电流计的偏转角最终皆为 θ_0. θ 与 t 的关系如图 11－2 所示的曲线. 由曲线可看出:电流计的欠阻尼运动是偏角 θ 经过一系列的振荡衰减,最后到达平衡位置的;临界阻尼运动是电流计在非周期运动中用最短时间到达 θ_0 角的,并有关系式:$\theta\leqslant\theta_0$;过阻尼运动是电流计偏角缓慢地转到平衡位置 θ_0,它的'惯性'较大. 为了减少测量时间,通常使电流计工作在近临界的欠阻尼运动状态,并且取 θ 满足下列条件:

$$\frac{|\theta-\theta_0|}{\theta_0}\leqslant\varepsilon \tag{11-12}$$

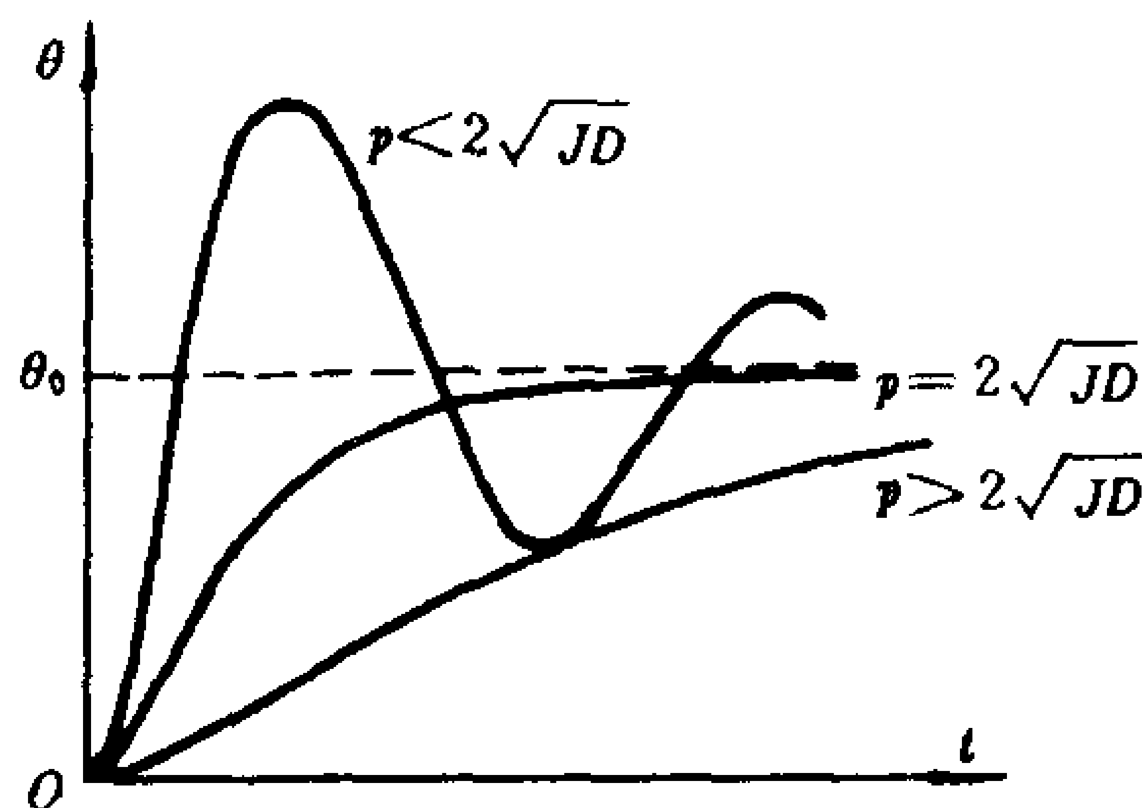


图 11－2 偏转角与时间的关系曲线

式中 ε 为电流计的最小分度与量程之比值,或取电表的级别. 满足(11－12)式并且达到偏角变化小于 $\varepsilon\theta_0$ 的最短时间,定义为电流计的读数等待时间或者响应时间. 经过计算,偏角在平衡值 $\theta_0\pm0.01\theta_0$ 范围内的最短读数等待时间为 T_0 的 0.67 倍[①],此时电

① 以不同的 γ 和 t 值代入(11－11)式,将计算的结果作各种 γ 的 $\theta-t$ 曲线图,在纵坐标上划出 $\theta_0\pm0.01\theta_0$ 的区域范围,观察哪种 γ 时,θ 最早进到上述区域并且以后不再超出此范围.

$\varepsilon/\%$	γ	t/T_0
10	0.6	0.37
1	0.83	0.67
0.1	0.91	1.0

流计工作在 $\gamma=0.83$ 的欠阻尼运动状态. 为了方便查阅,列出 $\varepsilon-\gamma-t/T_0$ 表可供参考和使用. 由表可知,分辨力(ε)越高,电流计的响应时间越长. 灵敏电流计只有在要求分辨力无限高的极限情况下,才工作在临界阻尼状态,用以测量微小的直流电流最为合适. 如果测量的电流是短暂的突变电流,且突变的时间 τ 远远小于灵敏电流计的自由振荡周期,那么电流计可工作在过阻尼状态并测量 τ 时间内通过电流计的电量 $\left(=\int_0^\tau i\,\mathrm{d}t\right)$[①].

用灵敏电流计测量微电流时,除了要正确选择运动状态,尽可能"同时"测量之外,还要精确地知道它的灵敏度 S_i 和内阻 r_G 的大小. 根据电流计偏角 θ_0 值,利用(11-1)式可得到待测电流的数值. 由于动圈的 S、D 和所在磁场的 B 不能精确地测定,因此电流计的电流灵敏度 $S_i\left(=\dfrac{NSB}{D}\right)$ 不是用计算求得,而是用实验方法来确定.

3. 灵敏电流计的灵敏度和内阻的测量方法

图 11-3 为某一电路的支路,其中 G 为灵敏电流计,$R_{G内}$ 为电流计内阻,R_1 为串联的可调电阻箱,设 ab 间电压为 U_{ab},则

$$U_{ab}=I_G R_{G内}+I_G R_1 \qquad (11-13)$$

I_G 为支路的电流. 从上式可以考虑,如果改变 U_{ab} 的同时调节 R_1 使电流 I_G 恒定不变,则可从(U_{ab}、R_1)的线性关系中求出 I_G 和 $R_{G内}$. 实际上由于 U_{ab} 值很小($\approx 10^{-5}$ V)不能用普通的电压计测

① 详细讨论可参看本书"实验十二,冲击电流计特性的研究"中的原理部分.

量,可以采用图 11－4 的分压电路. 如果$\frac{R_2}{R_3} \approx \frac{1}{10^5}$,则 $U_{ab}=10^{-5}$ V 时,U_{ac}可达 1 V. 图 11－5 是实用电路,由分压器 R_4 可以改变加到 a、c 二点间的电压,电压值可用普通伏特计测量,其次由 R_2、R_3 又构成一分压器,使 a、b 间有微小的但可变化的电压 U_{ab}:

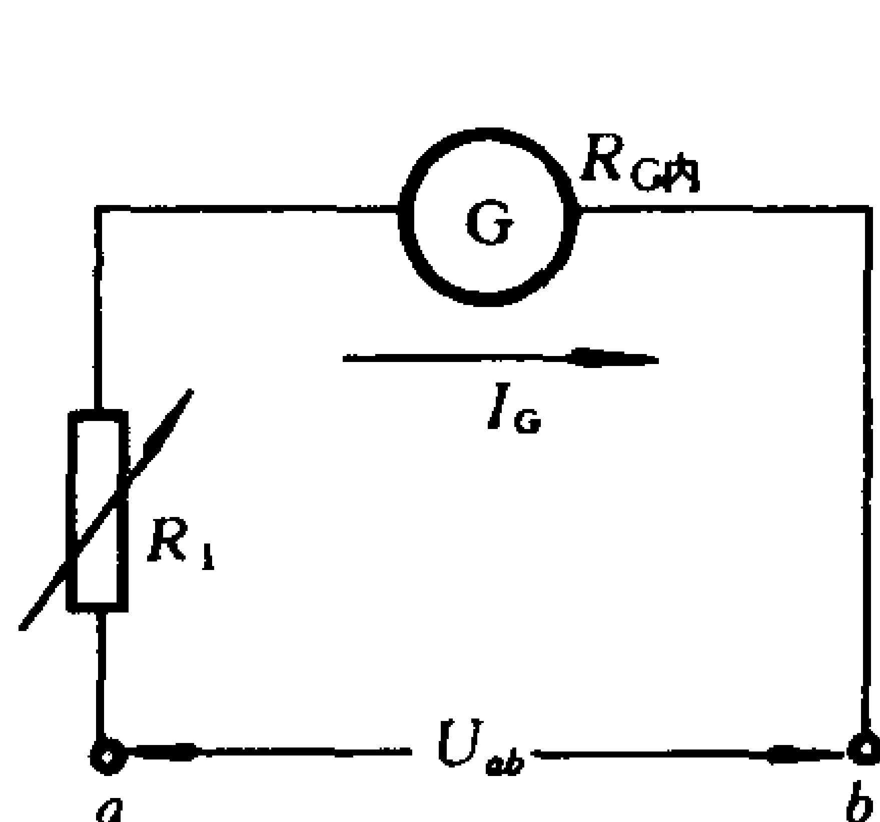


图 11－3

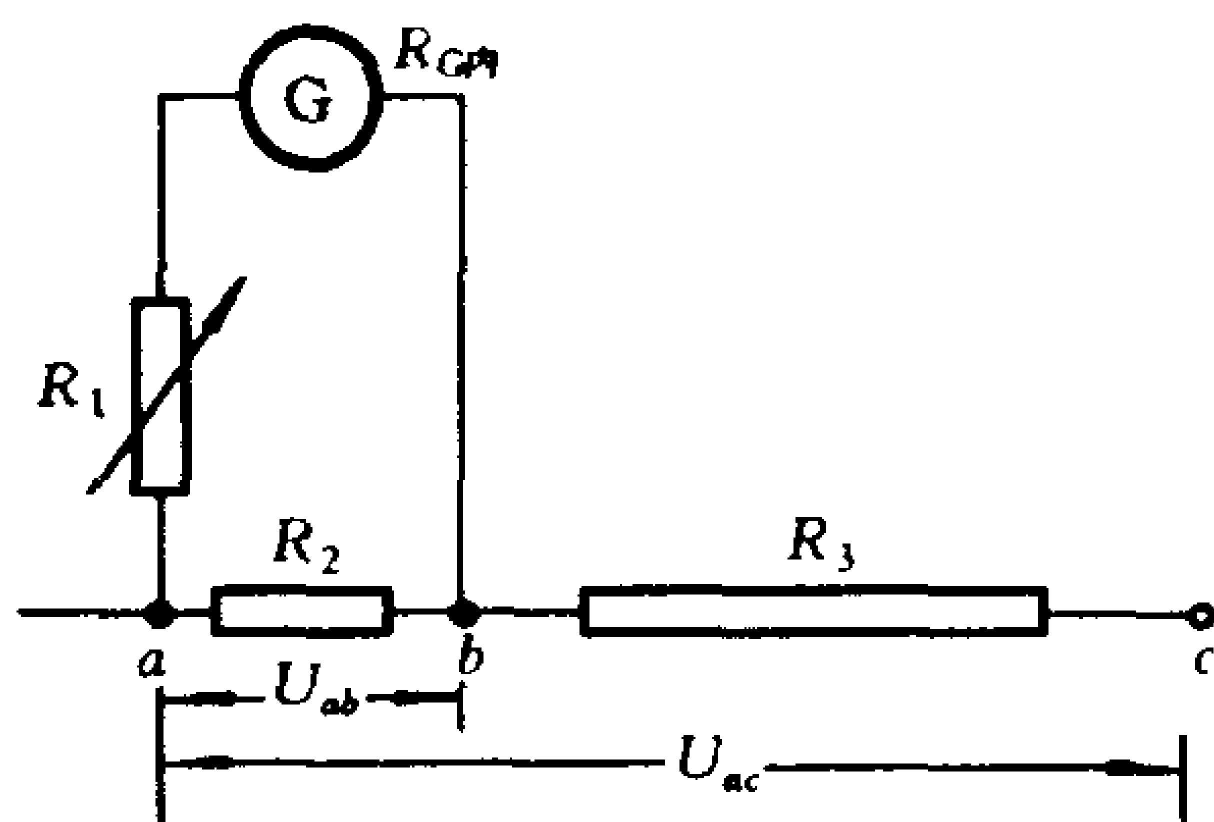


图 11－4

$$U_{ab}=U_{ac}\frac{R_{ab}}{R_{ab}+R_3} \qquad (11-14)$$

式中 R_{ab}为 a、b 二点间电阻:

$$R_{ab}=\frac{(R_1+R_{G内})R_2}{R_1+R_2+R_{G内}} \qquad (11-15)$$

实际上 R_2 约为 R_3 的十万分之一,因此式(11－14)可近似为

$$U_{ab}\approx U_{ac}\frac{R_{ab}}{R_3} \qquad (11-16)$$

将式(11－15)代入式(11－16)再代入式(11－13),可得

$$U_{ac}\frac{(R_1+R_{G内})R_2}{R_3(R_1+R_2+R_{G内})}$$
$$=I_G(R_1+R_{G内})$$

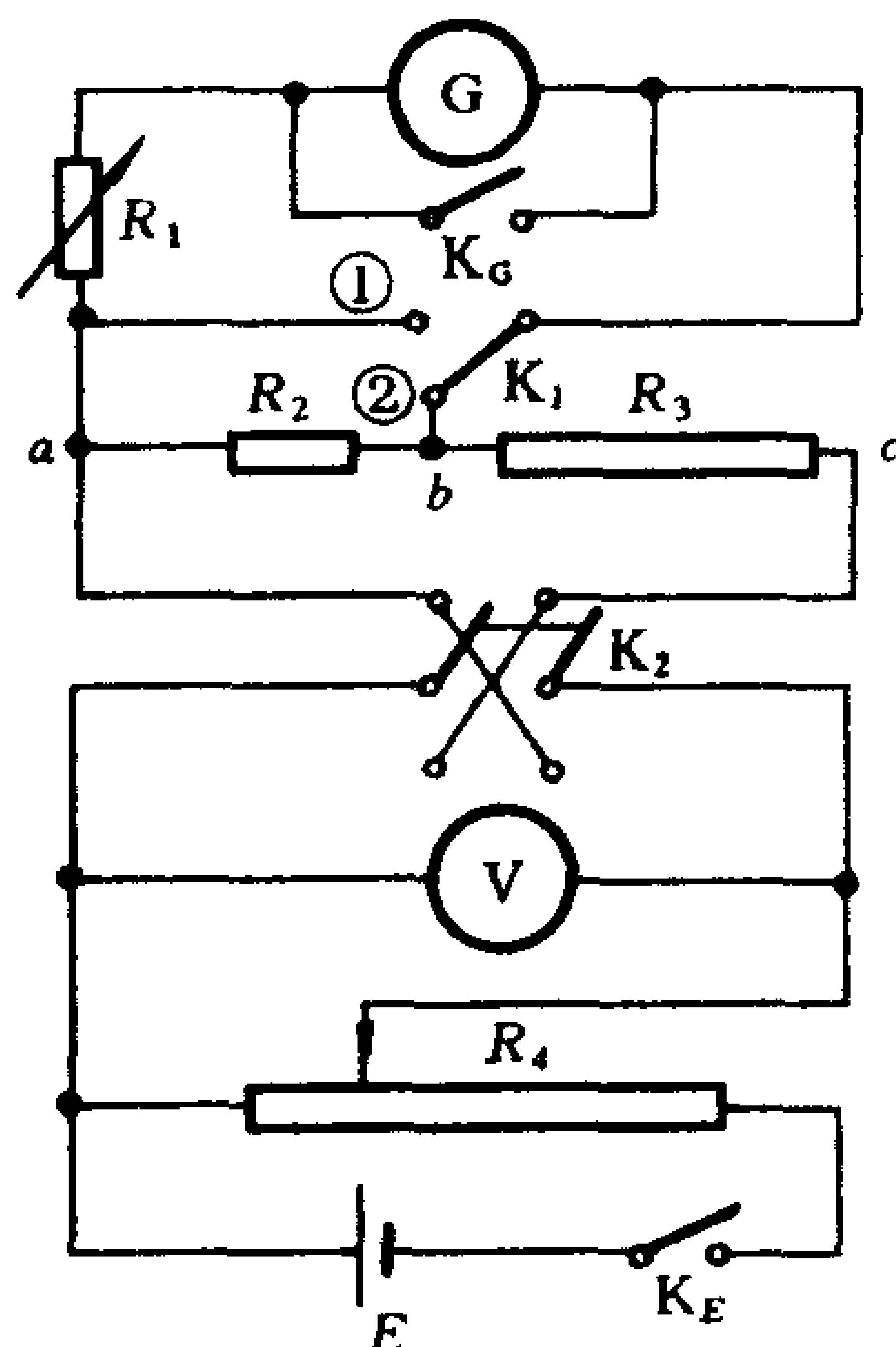


图 11－5

整理上式成为

$$R_1 = -(R_2 + R_{G内}) + \frac{R_2}{R_3 I_G} U_{ac} \qquad (11-17)$$

使上式中除 R_1 和 U_{ac} 外均保持不变,则它是一直线方程. 令 $A = -(R_2 + R_{G内})$, $B = \frac{R_2}{R_3 I_G}$,则

$$R_1 = A + B \cdot U_{ac} \qquad (11-18)$$

实验时测出 n 组(U_{ac}, R_1),可用绪论中§2、§3、§4 的一种方法求出截距 A 和斜率 B. 又 R_2、R_3 为已知值,所以

$$\left.\begin{aligned} R_{G内} &= -(R_2 + A) \\ I_G &= \frac{R_2}{R_3 B} \end{aligned}\right\} \qquad (11-19)$$

设实验时,由 R_1 控制电流计的偏转为恒定的 N 个格,则电流计灵敏度 S_I 为

$$S_I = \frac{N}{I_G} = \frac{NR_3 B}{R_2} \ (\mathrm{div \cdot A^{-1}}) \qquad (11-20)$$

图 11－5 中 K_2 为转向开关,它可以改变电流计 G 中的电流方向,测量时对同一 U_{ac} 值使电流计向左、右偏转分别测一次,得 R_1' 和 R_1'',取其平均为 R_1,可消除电流左右偏转不对称引入的系统误差. 开关 K_G 可使电流计短路,它可使摆动不止的电流计的线圈立即停下来.

实验内容

1. 参照图 11－5 联接电路,R_1 为电阻箱,R_2 为 2 Ω 标准电阻(或用电阻箱,但要注意调到 2 Ω 后不许再动),R_3 为电阻箱(取 90 kΩ),电源电压约取 3 V.

2. 测定灵敏电流计的自由振荡周期 T_0

分压器 R_4 取小值,R_1 取最大值,换向开关 K_2 倒向任一侧,

断开 K_G,K_1 指向②,旋转"零点调节"将电流计光斑调到中间的"0"线上,检查电路无误后,闭合电源开关 K_E.

将分压值调到 0.5 V,逐渐减小 R_1 观察电流计光斑的移动,使偏移 $d=50$ mm,将 K_1 指向①,用停表测量电流计自由摆动 10 次的时间,求出 T_0.

3. 观察三种运动状态并确定临界阻尼电阻 $R_{临}$

首先检查零点,K_1 指向②,R_1 取较大值(例如 2 000 Ω),调 R_4 使电流计偏转刚好为 $d=50$ mm,将 K_1 指向①观察并记录电流计光斑摆回到零点的时间;逐渐减小 R_1 值,重复上述操作和记录,直至达到过阻尼状态为止. 每次 R_1 改变多少自己去考虑,要求能观察 10 个不同的 R_1 即可.

通过以上观察,可以大体上确定临界阻尼 $R_{临}$ 之值,再反复仔细观察在临界阻尼附近的运动,确定临界阻尼 $R_{临}$ 的比较准确值(要注意在临界阻尼附近的运动有何特点?)

4. 测量电流计的 S_I 和 $R_{G内}$

调 R_4 使 U_{ac} 等于 0.5 V,调 R_1 使偏转 $d=50$ mm,记录 U_{ac} 及 R_1 之值(用 K_2 使向左右各偏转一次,R_1 读数分别为 R'_1 和 R''_1),增大 U_{ac} 重复上述测量,直至 $U_{ac}=2$ V 为止①,要求测量 6 点以上. 参照式(11-17)~(11-20)确定 S_I 及 $R_{G内}$之值.

预习思考题

1. 灵敏电流计为什么"灵敏"?

2. 动圈在磁场中运动时受到哪几种力矩的作用? 这些力矩产生的原因是什么?

3. 灵敏电流计有几种运动状态? 研究它有什么意义?

4. $\varepsilon=1\%$, $\gamma=0.83$, $t/T_0=0.67$ 是什么意思?

---

① 根据实验室电流计的规格,U_{ac} 的起、止值可以改变.

5. 测量 S_i 和 $R_{G内}$ 的原理是什么?

6. R_2 是什么电阻? 怎样正确使用各个接线端钮?

复习思考题

1. 灵敏电流计在不使用时,为何要将动圈短路?

2. 测量 S_i 的主要误差来源是什么?

3. 怎样改变电流计的 S_i 和 $R_{G内}$ 值?

4. 怎样改变电流计的阻尼系数 γ?

5. 光点反射式灵敏电流计的光路如图 11－6 所示,试问:固定反射镜有什么作用?

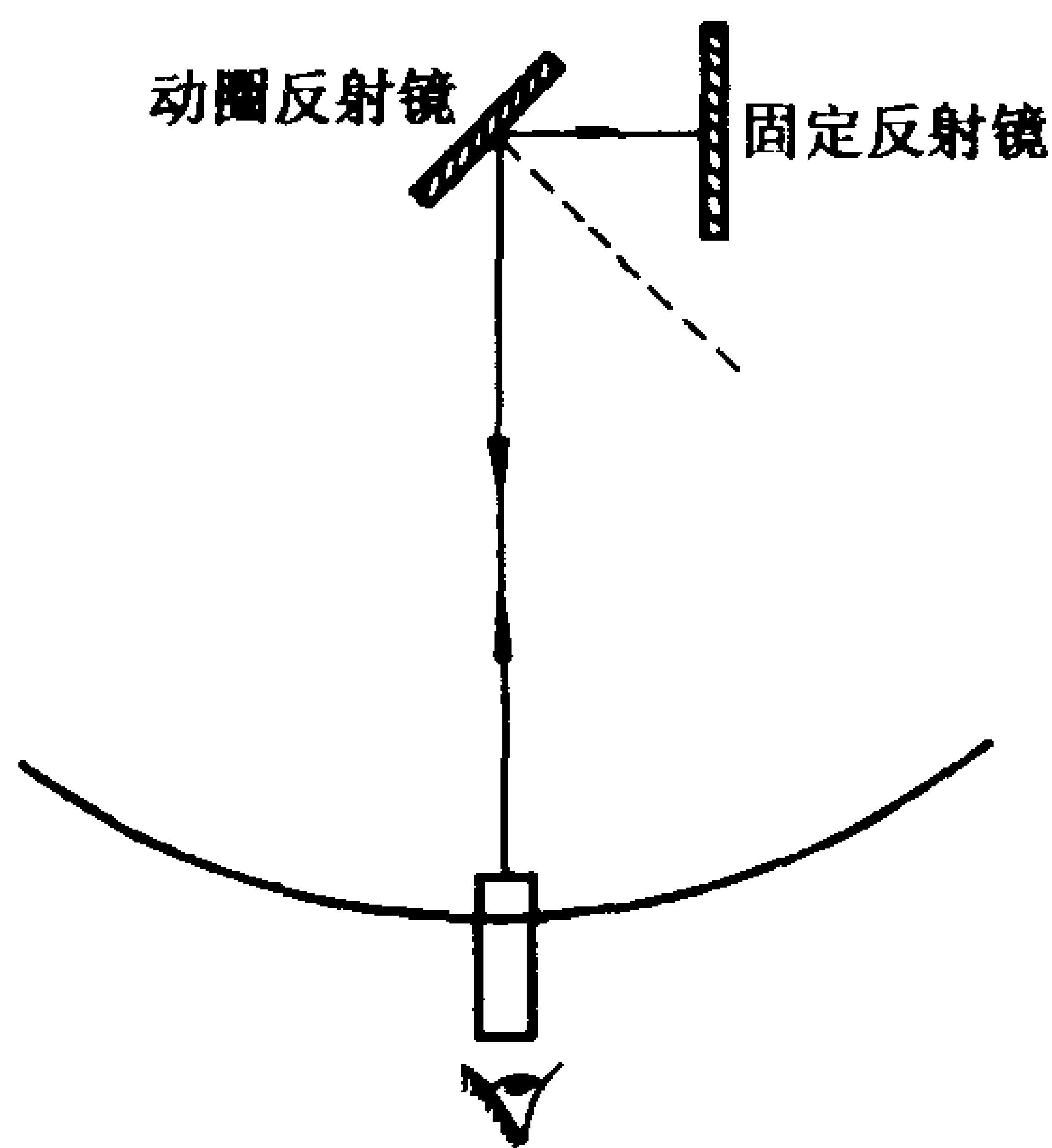


图 11－6　光点反射式灵敏电流计的光路图

测量举例

电流计内阻 $R_{G内}$ 及电流计常量 K 的测量

所用的仪器与用具:电流计,R_1、R_3 为 ZX 21 电阻箱,R_2 为 ZX 36 电阻箱,电压计(0.5 级,0～2 V).

实验时,$R_2=2\ \Omega$,$R_3=90\ \text{k}\Omega$,每次电流计偏转 $N=50$ 格. R_1 为左右一次平均值. a、c 间电压和 R_1 的测量值见下表:

U_{ac}/V	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
R_1/Ω	7.9	22.2	36.6	51.2	65.2	79.4	93.9

由于 $R_1 = A + BU_{ac}$，用最小二乘法求截距 A、$s(A)$，斜率 B、$s(B)$得　$A = -20.696\ \Omega, s(A) = 0.155\ \Omega$

$$B = 57.3\ \Omega/\text{V}, s(B) = 0.115\ \Omega/\text{V}, r = 0.99998$$

而　$R_{G内} = -(R_2 + A) = -2\ \Omega + 20.696\ \Omega = 18.696\ \Omega.$

$K = R_2/(N \cdot R_3 \cdot B) = [2\ /(50 \times 90 \times 10^3 \times 57.3)]\text{A} \cdot \text{div}^{-1}$
$= 7.76 \times 10^{-9}\ \text{A/div}$

计算 $R_{G内}$ 的 $u(R_{G内})$，先计算 R_2 和 A 的 $u(R_2)$、$u(A)$.

R_2 电阻箱个位挡的准确度为 0.5%，则 $u_B(R_2) = 0.005 \times 2\ \Omega/\sqrt{3} = 0.0058\ \Omega$

A 的不确定度主要来自：

(1)直线拟合 $u_A(A) = 0.155$

(2) 电压计的不确定度　电压计自身的 $u_B(U) = 0.5\% \times 2/\sqrt{3}$用$[U_{ac} + u_B(U)]$代替 U_{ac}求截距$A' = -21.023$ 则取电压计使 A 引入不确定度$u_B(A_U) = |A - A'| = 0.327$

(3) 电阻 R_1 的不确定度　$u_B(R_1) = 0.01 \times R_1/\sqrt{3}$，用$[R_1 + U(R_1)]$代替 R_1 求截距 $A'' = -20.812$，则由 R_1 使 A 引入不确定度

$$u_B(A_{R_1}) = |A - A''| = 0.116$$

A 的合成标准不确定度 $u_c(A) = \sqrt{0.155^2 + 0.327^2 + 0.116^2} = 0.38$

$R_{G内}$的合成标准不确定度 $u_c(R_{G内}) = \sqrt{u_B^2(R_2) + u_c^2(A)} = \sqrt{0.005\,8^2 + 0.38^2} = 0.38$

计算 K 的不确定度：$u_B(R_2) = 0.005\,8\ \Omega$，估计 $u_B(n) = 0.1$ div

$$u_B(R_3)=0.001\times 9\times 10^4\ \Omega/\sqrt{3}=51.9\ \Omega$$

$$u_c(B)=\sqrt{0.115^2+0.331^2}\ \Omega/\mathrm{V}$$

$=0.35\ \Omega/\mathrm{V}$(参照 $u_c(A)$的计算,$u_B(U)$不影响 B).

$$u_c(K)$$

$$=K\sqrt{\left(\frac{u(R_2)}{R_2}\right)^2+\left(\frac{u(n)}{n}\right)^2+\left(\frac{u(R_3)}{R_3}\right)^2+\left(\frac{u_c(B)}{B}\right)^2}\ \mathrm{A/div}$$

$$=0.05\times 10^{-9}\mathrm{A/div}$$

测量结果:$R_{G内}=(18.70\pm 0.38)\ \Omega$, $K=(7.76\pm 0.05)\times 10^{-9}$ A/div.

实验十二　冲击电流计特性的研究

目的

1. 了解冲击电流计的工作原理；

2. 观察冲击电流计在过阻尼、临界阻尼和欠阻尼情况下的三种运动状态；

3. 测定冲击电流计常量，初步掌握冲击电流计的使用方法.

仪器和用具

墙式冲击电流计、标准互感器、直流安培表，变阻器、电阻箱、直流电源等.

原理

1. 冲击电流计的工作原理

冲击电流计是电磁测量中的基本精密仪表之一. 它不仅可以直接测量短时间内脉冲电流所迁移的电荷量，而且还可以间接测量与电荷量有关的物理量，如磁感应强度，电容等.

冲击电流计的主要结构如图 12－1 所示. 从望远镜中可看到小圆镜反射的标尺像. 望远镜目镜内装有叉丝，用来作为读数的指标，小镜偏转 θ_m 时，从望远镜中可读出标尺偏移的弧距 d_m.

它的结构与灵敏电流计相似，唯一不同的是冲击电流计的线框比灵敏电流计的线框要扁而宽，也有不少冲击电流计其线框和灵敏电流计的一样，而在小反射镜与线圈之间再连接一圆盘，这两种结构都是为了增加转动惯量 J，使动圈自由振荡周期 T_0 增长，达到 20 s 左右，而灵敏电流计的自由振荡周期 T_0 只有 2～4 s.

冲击电流计所测量的脉冲电荷量 Q，实质上是测量短暂时间

τ 内脉冲电流 i 所迁移的电荷量 $\left(Q=\int_0^\tau i\mathrm{d}t\right)$. 当脉冲电流通过冲击电流计时,由于电流计线框的转动惯量 J 较大,线圈虽然有一角加速度,但还来不及偏转,仍然处于静止状态,只是在冲击电流计的线圈受到脉冲电流的冲量矩作用之后才发生偏转的,而灵敏电流计中的线圈是在受到恒定不变的磁力矩作用下而发生偏转的,两者虽然都是由电流驱动,但前者属脉冲型电流计,后者属稳定型电流计,因而它们的用途不同,用法也不一样,用灵敏电流计时读的是它的稳定偏转角 θ,而用冲击电流计时读的是第一次最大的偏转角 θ_m,称为冲掷角.

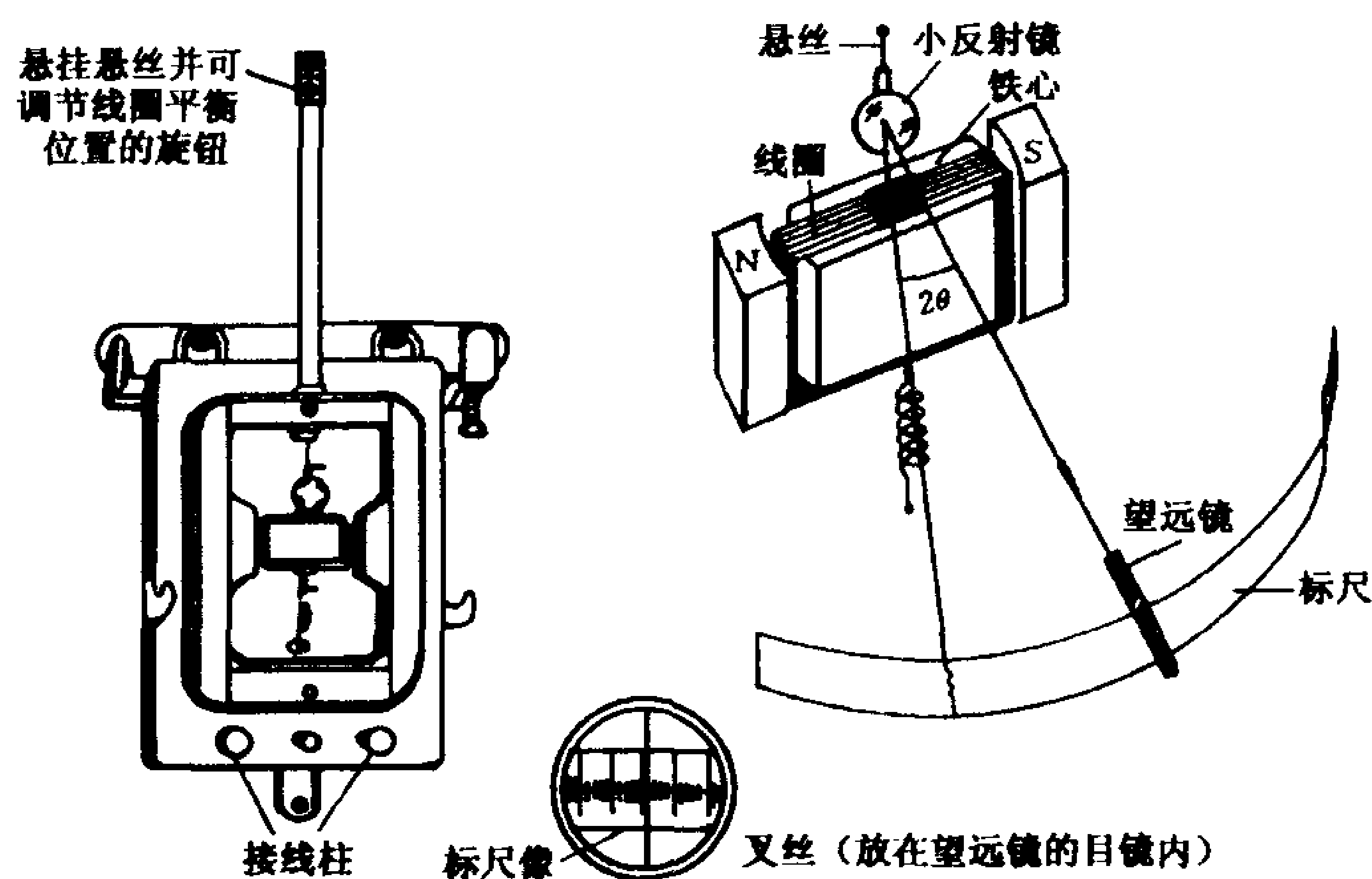


图 12－1 冲击电流计结构图

根据作用在线圈上的力矩,可以写出动圈在时间 τ 内的动力学方程:

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}=M_{磁}+M_{弹}+M_{阻} \qquad (12-1)$$

上式第一项是磁偏转力矩 $M_{磁}=NISB$, N 为线圈的匝数, I 是通入线圈的电流, S 是线圈的面积, B 是线圈两竖直边所在处的磁感应

强度. 第二项是弹性扭力矩 $M_{弹} = -D\theta$, D 是悬丝的扭转常数, θ 是偏转角,式中负号表示 $M_{弹}$ 与 θ 的方向相反. 第三项是电磁阻尼力矩 $M_{阻} = -\frac{(NSB)^2}{R}\frac{d\theta}{dt}$, R 为线圈本身电阻 $R_{内}$ 和外电路电阻 $R_{外}$ 之和,即 $R = R_{内} + R_{外}$,式中负号表示 $M_{阻}$ 的方向永远和角速度 $\frac{d\theta}{dt}$ 的方向相反,即 $M_{阻}$ 的大小与 $\frac{d\theta}{dt}$ 成正比,角速度越大,线圈所受的电磁阻尼力矩也越大;线圈静止时,就没有电磁阻尼力矩. 令

$$p = \frac{(NSB)^2}{R} = \frac{(NSB)^2}{R_{外} + R_{内}} \tag{12-2}$$

于是 $M_{阻} = -p\frac{d\theta}{dt}$,式中 p 称为电磁阻尼系数,它除了与电流计本身的常量($N, S, B, R_{内}$)有关外,还与外电路的电阻 $R_{外}$ 有关.

由以上三个力矩的作用,决定了线圈的运动状态:

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} = NSBI - D\theta - p\frac{d\theta}{dt}$$

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + p\frac{d\theta}{dt} + D\theta = NSBI \tag{12-3}$$

将上式对时间积分,得到

$$\int_0^\tau J\frac{d^2\theta}{dt^2}dt + \int_0^\tau p\frac{d\theta}{dt}dt + \int_0^\tau D\theta dt = \int_0^\tau BNSi dt = G\int_0^\tau i dt$$

式中 $G = BNS$. 因为冲击电流计在 $[0, \tau]$ 期间内,当

$$t = 0 \text{ 时 } \theta_0 = 0, \omega(0) = 0; t = \tau \text{ 时 } \theta_\tau = 0, \tag{12-4}$$

因此

$$J\frac{d\theta}{dt}\Big|_0^\tau + p\theta\Big|_0^\tau + D\int_0^\tau \theta dt = G\int_0^\tau i dt$$

$$\omega_\tau = \left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{t=\tau} = \frac{G}{J}\int_0^\tau i dt = \frac{G}{J}Q \tag{12-5}$$

上式表明,线圈在 $t = \tau$ 时刻的角速度 ω_τ 正比于迁移的电荷量 Q.

冲击电流计的线圈在受到脉冲电流通过的时间内,虽有一角加速度,但还来不及偏转,仍然处在准静止状态,但当线圈开始偏转时,脉冲电流已通过完毕,所以线圈便在 $M_{扭}$ 和 $M_{阻}$ 两个力矩作用下减速下来,在此期间电流计线圈运动方程为

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}=M_{扭}+M_{阻}=-D\theta-p\frac{d\theta}{dt}$$

或 $$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+p\frac{d\theta}{dt}+D\theta=0 \tag{12-6}$$

这是典型的振动方程. 上式的初始条件为

$$\theta(0)=0,\ \dot{\theta}(0)=\omega(0)=\frac{G}{J}Q$$

其特征方程为

$$Jr^2+pr+D=0 \tag{12-7}$$

$$r_{1,2}=\frac{-p\pm\sqrt{p^2-4JD}}{2J}$$

根据冲击电流计回路总电阻 R 的不同,式(12-7)在以下三种情况下的解(参看本实验后的附记)对应于三种运动状态:

(1) 当 $p^2-4JD<0$ 时,即 $\gamma<1$.

$$\theta=\frac{2\gamma(R_{内}+R_{外})}{G\sqrt{1-\gamma^2}}e^{-\gamma\omega_0 t}\sin(\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\,t) \tag{12-8}$$

式中 $\omega_0=\sqrt{\frac{D}{J}}$ 称为自由振荡角频率$\left(自由振荡周期即为 T_0=2\pi\sqrt{\frac{J}{D}}\right)$, $\gamma=\frac{p}{2\sqrt{JD}}$, 令 $p=\frac{(BNS)^2}{R}$, $G=BNS$, 故 $\gamma=\frac{p}{2\sqrt{JD}}=\frac{G^2}{2\sqrt{JD}R}$, 令$\frac{G^2}{2\sqrt{JD}}=R_k$ 称为冲击电流计结构常量. 则

$$\gamma=\frac{R_k}{R} \tag{12-9}$$

式中 $R=R_{外}+R_{内}$, $R_{外}$ 为冲击电流计的回路外阻,只要改变 $R_{外}$ 就有不同的 γ,即有不同的阻尼运动,故称 γ 为阻尼度. 式(12-

8)表示冲击电流计线圈作振幅按指数规律衰减的振荡,它处于欠阻尼状态,如图 12－2 中曲线①,当 $\gamma=0$ 时,对应 $R_{外}\to\infty$ 即开路情形,这时无感应阻尼电流存在,即冲击电流计线圈经零点作无阻尼的等幅正弦振动,如图 12－2 中的曲线①′.

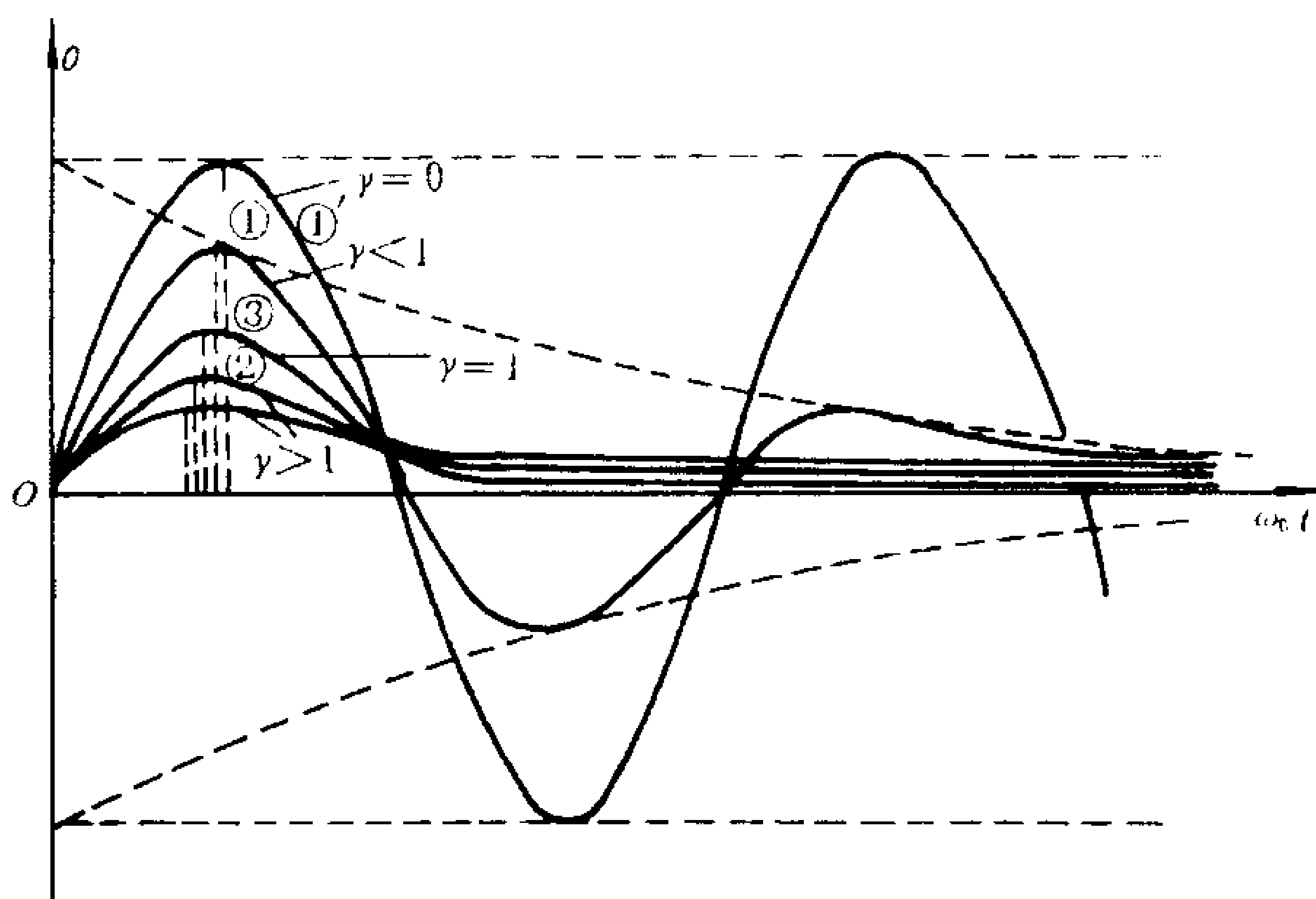


图 12－2　当 Q 恒定时,θ 在不同 γ 下的三种运动状态

由前可知,冲击电流计是属脉冲型电流计,它所测读的是第一次最大偏转角,也称冲掷角. 为求得冲掷角只要对 $\theta(t)$ 求极值 $\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=0\right)$即可. 我们先求得线圈达到第一次最大偏转角的时间 t_{m},然后将 t_{m} 代入式(12－8),即求得第一次最大偏转角 θ_{m}(具体计算详见附记):

$$t_{\mathrm{m}}=\frac{1}{\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}}\ \mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}$$

$$\theta_{\mathrm{m}}=\frac{2\gamma(R_{外}+R_{内})Q}{G}\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}}\ \mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right]$$

(2) 当 $p^2-4JD>0$,即 $\gamma>1$ 时,$R<R_k$.

$$\theta = \frac{2\gamma(R_{外} + R_{内})Q}{G\sqrt{\gamma^2 - 1}} e^{-\gamma\omega_0 t} \text{sh}(\omega_0 \sqrt{\gamma^2 - 1}\, t) \tag{12-10}$$

$$t_m = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{\gamma^2 - 1}} \text{arth} \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma}$$

$$\theta_m = \frac{2\gamma(R_{外} + R_{内})Q}{G} \exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \text{arth} \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma} \right]$$

上式表明线圈作非周期性衰减运动,它处于过阻尼状态,如图 12－2 中曲线②.

(3) 当 $p^2 - 4JD = 0$,即 $\gamma = 1, R = R_k$.

$$\theta = \frac{2\omega_0 t(R_{外} + R_{内})Q}{G} e^{-\omega_0 t} \tag{12-11}$$

$$t_m = \frac{1}{\omega_0}$$

$$\theta_m = \frac{2(R_{外} + R_{内})}{G} e^{-1}$$

此式表明线圈作非周期性衰减运动,实际它是周期振荡的阻尼向非周期阻尼过渡的状态,称为临界阻尼状态,这时的 $R = R_k$ 称临界阻尼电阻,对应的 $R_{外} = R_k - R_{内}$ 称为外临界电阻. 处于临界阻尼状态的线圈回零最快,如图 12－2 中曲线③.

根据以上分析,我们可得到如下一些结论:

(1) 冲击电流计的第一次最大偏转角 θ_m 与电荷量 Q 成正比. 由于冲击电流计在测量时不是直接测量 θ_m,而是测出偏移的弧距 d_m,从图 12－1 可看出它们之间的关系为

$$\theta_m = \frac{d_m}{2L}$$

式中 L 是标尺到小镜之间的距离,由此也可说偏移距离 d_m 与电荷量成正比,即

$$d_m = S_Q Q, S_Q = \frac{d_m}{Q} \tag{12-12}$$

式中比例系数 S_Q 称为冲击电流计电量灵敏度，它表示通过单位电荷量时所能引起的最大偏转距离，单位通常为毫米每库仑，其倒数

$$k_Q = \frac{1}{S_Q} = \frac{Q}{d_m} \tag{12-13}$$

称为冲击电流计电量常量，它表示引起单位最大偏转距离所需通过的电荷量，单位通常为库仑每毫米．在测量电量时，如已知冲击电流计电量常数 k_Q，若测出其最大偏转距离 d_m，则电量 $Q = k_Q d_m$．

(2) 冲击电流计电量灵敏度 S_Q（或 k_Q）不仅与它的结构常量有关，还与电流计所在回路中的总电阻 $R = R_{外} + R_{内}$ 有关，因此在用冲击电流计测量电荷量时必须在阻尼状态不变的条件下，也即总电阻 R 不变的条件下，测出对应的 S_Q 或 k_Q，才能算出脉冲电荷量 Q 值．

(3) 当研究冲击电流计的三种运动状态时，在保持电荷量不变的条件下，改变其回路中的总电阻 R，就可观察到线圈产生最大偏转后，按阻尼不同而采取不同的运动方式回到零平衡位置．当 $\gamma < 1$ 时，线圈处于欠阻尼运动状态；$\gamma > 1$ 时，线圈处于过阻尼状态；$\gamma = 1$ 时，线圈处于临界阻尼状态，此时线圈回到零平衡位置所需时间最短．

2．电量灵敏度 S_Q 的测量

在电磁测量中，电量灵敏度 S_Q 可用不同方法来进行测量，这里介绍的是利用标准互感器来测定，测量线路如图 12－3 所示：

E——直流电源．

R_1、R_2——变阻器，用来粗调、细调初级回路电流．

M——标准互感器用于产生脉冲电荷量．

R_3——电阻箱，用来改变冲击电流计的工作状态．

BG——冲击电流计，其内阻为 $R_{内}$．

K_E——电源开关．

K_1——换向开关，使互感器次级回路电流换向．

K_2——单刀开关．控制冲击电流计回路的通与断．

K_3——阻尼开关.

A——电流表. 测量初级回路电流用.

先将 K_2 开关接通,使冲击电流计与标准互感器次级线圈接通,然后利用换向开关换向,使电流由 I 变为 $-I$,即使电流变化为 ΔI,与此相应在互感器次级线圈中磁通变化为 $\Delta\phi$,次级线圈两端产生的感应电动势为

$$E_{感} = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$$

由此在冲击电流计回路中产生一个脉冲电流 i,则电路方程

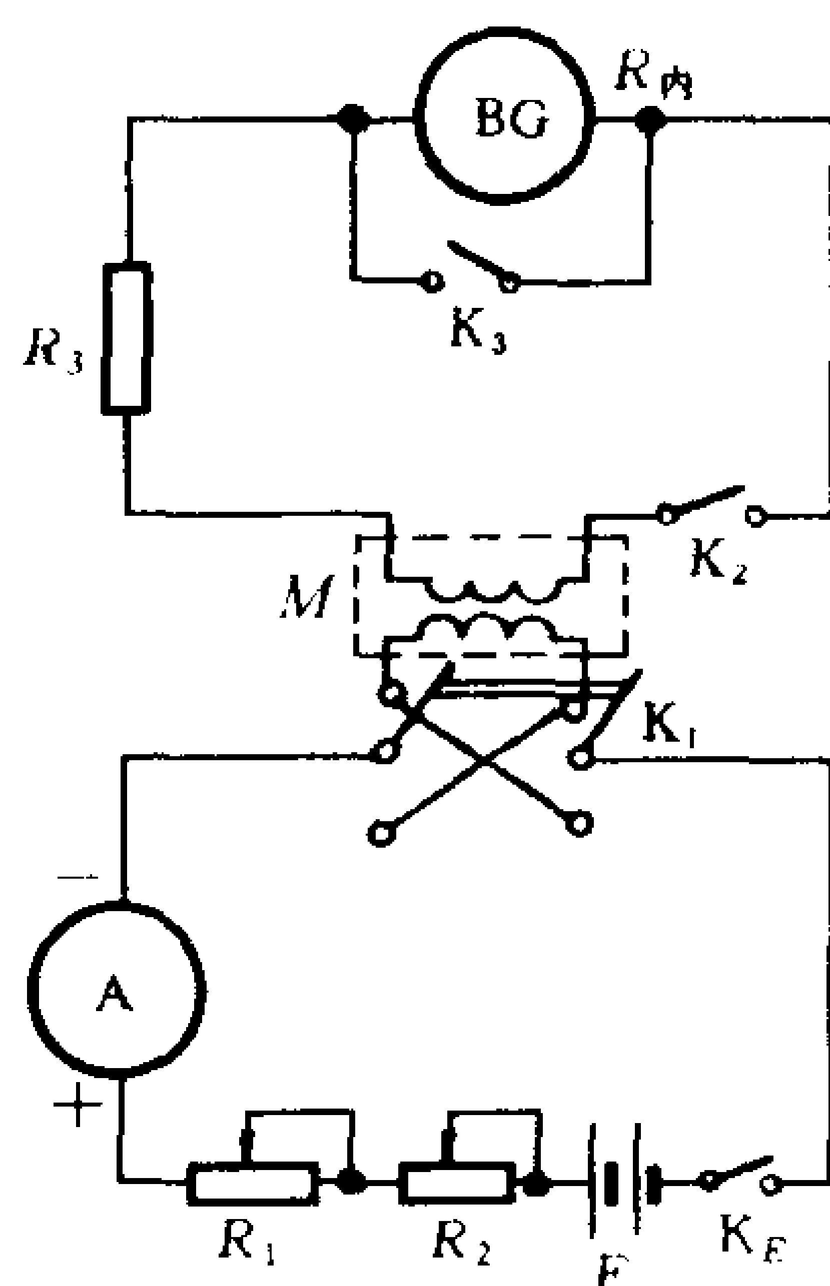


图 12-3 冲击常量测试电路图

$$E_{感} = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = iR + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{12-14}$$

式中 R 和 L 为回路中的电阻和电感. 将上式两边对时间积分

$$-\int_0^\tau \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t = R\int_0^\tau i\mathrm{d}t + L\int_0^\tau \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t$$

式中 τ 为磁通发生变化的持续时间,也就是在互感器电流发生变化的持续时间. 由于在 $t=0$ 时,在次级回路 $i=0$, $t=\tau$ 时, $i=0$, 故上式右边第二项积分为零. 于是

$$\Delta\phi = RQ \tag{12-15}$$

由前可知,冲击电流计的最大偏转距离 d_m 和电荷量 Q 成正比,即

$$d_m = S_Q Q$$

代入上式得

$$\Delta\phi = R\frac{d_m}{S_Q}$$

$$S_Q = R\frac{d_m}{\Delta\phi} \tag{12-16}$$

而互感器次级线圈的磁通变化和初级线圈的电流变化成正比,

即
$$\Delta\phi = M\Delta I \tag{12-17}$$
式中 M 为标准互感器的互感系数，将此式代入上式即得
$$S_Q = \frac{Rd_m}{M\Delta I} \tag{12-18}$$
由上式可知，知道互感系数 M，初级线圈电流的变化 ΔI，以及冲击电流计的最大偏转距离 d_m 和整个回路的总电阻 $R = R_{外} + R_{内}$，即可求得电量灵敏度 S_Q 或电量常量 $k_Q\left(k_Q = \frac{1}{S_Q}\right)$.

3. 磁通灵敏度 S_ϕ 的测定

由上讨论可知，利用互感器测得的冲击电流计的电量灵敏度，实质上是利用磁通的变化来求得电量灵敏度，即
$$S_Q = \frac{Rd_m}{M\Delta I} = \frac{Rd_m}{\Delta\phi} \tag{12-19}$$
因此我们可引用磁通灵敏度 S_ϕ 的概念来描述，磁通灵敏度定义为
$$S_\phi = \frac{d_m}{\Delta\phi} = \frac{d_m}{M\Delta I} \tag{12-20}$$
它表示单位磁通的变化所能引起的最大偏转距离，单位常为毫米每韦伯，其倒数
$$k_\phi = \frac{1}{S_\phi} \tag{12-21}$$
称为磁通冲击常量.
代入式(12－19)可得电量灵敏度 S_Q 和磁通灵敏度的关系为
$$S_Q = RS_\phi \tag{12-22}$$
在测量中，如果知道互感系数 M、初级线圈电流变化，就可知道磁通变化($\Delta\phi = M\Delta I$)，测出冲击电流计的最大偏转距离 d_m，就可求得磁通灵敏度 S_ϕ. 这样，只需将 S_ϕ 乘上回路的总电阻 R 即可求得电量灵敏度 S_Q.

磁通灵敏度 S_ϕ 和电量灵敏度 S_Q 一样，不仅与冲击电流计的结构常量有关，而且还与阻尼度 γ 有关. 由式(12－20)可得

$$d_m = S_\phi \Delta\phi$$

当$\Delta\phi$恒定时d_m随S_ϕ增大而增大，图12－4表示当$\Delta\phi$恒定时θ_m在三种阻尼下的运动状态.

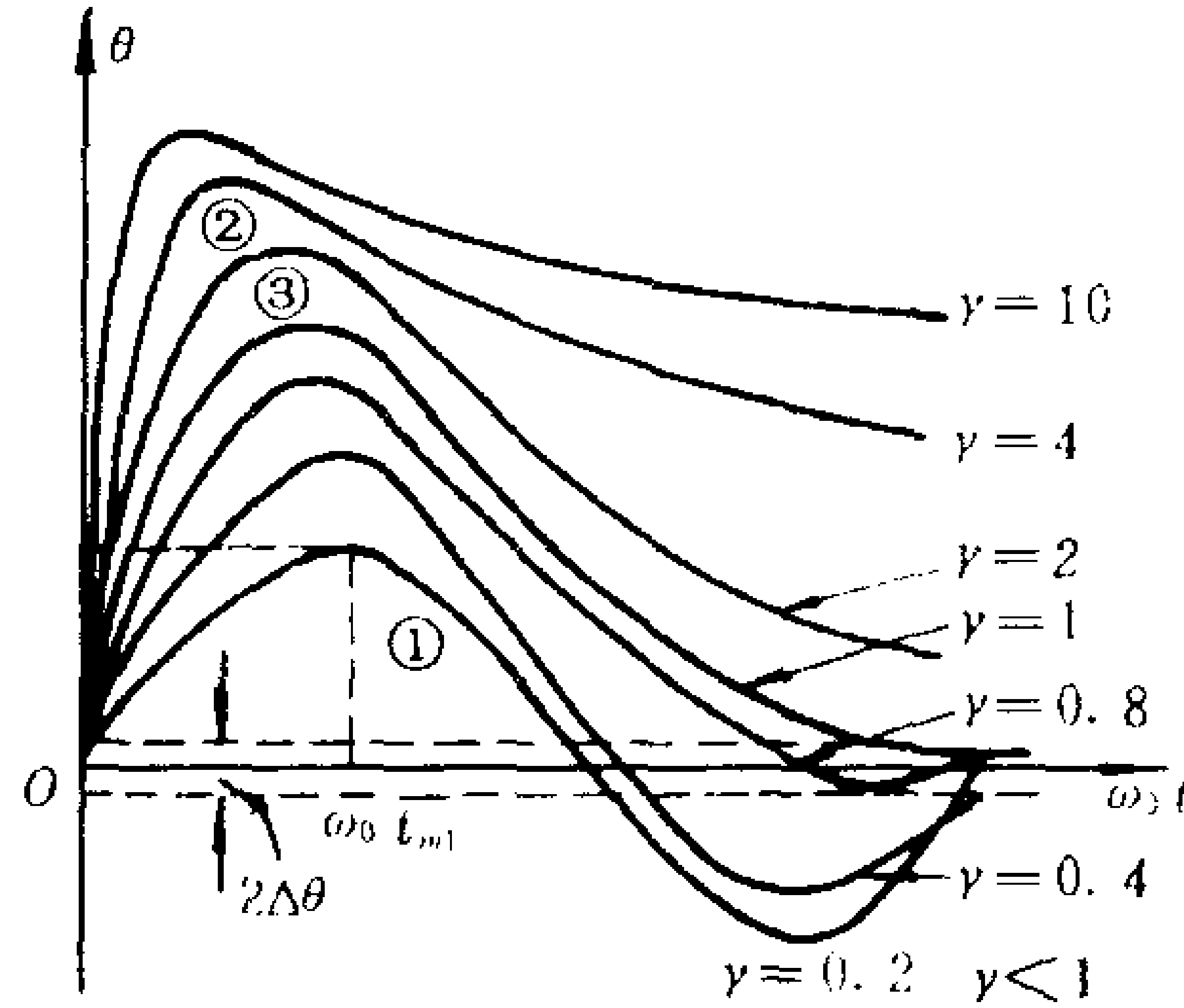


图12－4 当$\Delta\phi$恒定时，θ_m在不同γ下的三种运动状态

（$\Delta\theta$为电流计偏转角度的分辨值）

从图12－4可以看出，当磁通$\Delta\phi$恒定时，冲击电流计第一次最大偏转角θ_m随阻尼度γ的增大而增大，即γ越大磁通灵敏度S_ϕ越大，因此，在磁通测量过程中γ不宜选得太小(即R不宜过大)，否则S_ϕ很小，总之阻尼度可以通过改变R的阻值而选取，以获得所需要的磁通灵敏度.

为了减少冲击电流计中因标尺零点不准，悬丝左右扭力矩不等，系统安装不够正确等原因引起的系统误差，用K_1换向即得到标尺另一边的读数，然后取两次读数的平均作为d_m的读数. 即

$$\bar{d}_m = \frac{d_{m左} + d_{m右}}{2} \tag{12-23}$$

由式(12－20)可得 $d_m = MS_\phi \Delta I$.

若$\Delta I = I - (-I) = 2I$，则$d_m = 2MS_\phi I$，即

$$S_\phi = \frac{d_m}{2MI} \tag{12-24}$$

式(12－22)表明,冲击电流计的磁通灵敏度与冲击电流计回路中的总电阻有关,它是冲击电流计在某一工作状态下得到的,因此,这里要再次强调的是,冲击电流计回路总电阻 R 在测量和校准过程中要保持不变,这也就是为什么一旦冲击常量测定后,便不能随意改变总电阻的原因.

步骤和要求

1. 测定冲击电流计的自由振动周期 T_0

按图 12－3 接好电路,调节望远镜、叉丝和刻度标尺,改变滑线变阻器 R_1、R_2,使冲击电流计有较大的偏转,然后将换向开关 K_1 和 K_2 依次断开,用停表测 10 个周期的时间 T, $T_0=\frac{T}{n}$,测三次取平均,试与灵敏电流计自由振动周期加以比较.

2. 观察在不同外电阻 $R_外$ 时线圈的三种运动状态

在保持电荷量不变的条件下[①] 观察欠阻尼、过阻尼和临界阻尼三种运动状态,并测出线圈第一次最大偏转时的 d_m 值,记下偏转距离 d_m 和从零开始到最大偏转距离再回到平衡位置零点所需的时间,并加以比较,以判断 $R_外$ 在什么值时动圈回到平衡位置零点的时间最短. 观察时可以改变 $R_外$ 并参考下表所示的 I 值,以保持电荷量不变,当换向开关 K_1 换向时,观察冲击电流计的偏转,记下偏转距离值,再将换向开关换向,记下$(0\to d_m\to 0)$所需的时间. 电流 I 取合适的 I_0, I_0 值在勿超过标准互感器的额定电流值的条件下,尽量取得大些,若 $R=4R_k$(R_k 和 M 值均由实验室给出),则根据 I_0、M 和 R_k 可得脉冲电荷量 $Q=\frac{2MI}{R}=\frac{2MI_0}{4R_k}=\frac{MI_0}{2R_k}$.

---

① 只要保持电流表的指示值 I 与回路总阻值 R 的比值不变,就是保持电荷量不变,考虑一下为什么?

观察线圈的三种运动状态测量数据表如下：

$R=R_{内}+R_{外}$ (kΩ)	$R_{外}$(kΩ)	I(A)	d_m(mm)	$0\to d_m\to 0$ 的时间	振动次数
$4R_k$		I_0			
R_k		$\frac{I_0}{4}$			
$\frac{R_k}{2}$		$\frac{I_0}{8}$			

分析上述测量数据，你可得出哪些规律和结论.

3. 观察冲击电流计偏转值 d_m 和脉冲电荷量 Q 的关系

保持 $R=R_k$ 不变，依次改变电流 I，对于每种 I 值需要正反向测量 d_m 值，然后求平均并估计误差. 注意：电流勿超出标准互感器的额定电流值.

4. 在磁通变化恒定的条件(保持电流值不变)下，按冲击电流计三种运动状态测出十种不同的 $R_{外}$ 值所对应的 S_ϕ 与 S_Q 值，依次改变 R_3，测出换向开关换向时冲击电流计两侧的读数，并取平均值，以 R 为横坐标分别以 S_ϕ 和 S_Q 为纵坐标作 $S_\phi-R$ 曲线和 S_Q-R 曲线，并从曲线中分析其规律.

预习思考题

1. 冲击电流计与灵敏电流计的主要区别是什么？能否用灵敏电流计代替冲击电流计？

2. 图 12－3 中的 K_1 作用如何？实验过程中如何使用？K_2、K_3 的作用又如何？

3. 为什么要测量冲击电流计的电量(或磁通)灵敏度？

4. 为什么测偏转距离 d_m 采用左、右读数取平均的方法？

5. 冲击电流计有哪三种运动状态？

复习思考题

1. 三种运动状态对应的 S_ϕ 是否相同？哪一种运动状态的磁通灵敏度最高？为什么？

2. 冲击电流计的磁通灵敏度 S_ϕ 与阻尼电阻 R 有什么关系？它对选择冲击电流计的运动状态有什么指导意义？

3. 冲击电流计的磁通灵敏度、电量灵敏度与其外回路电阻有什么关系？试问冲击电流计处于何种状态下其磁通灵敏度最大？冲击电流计又处在何种状态下其电量灵敏度为最大？

4. 如果实验中遇到过阻尼或欠阻尼的情况，而测量时回路总电阻又不能改变，如何使返回零点的时间尽可能缩短一些？

5. 冲击电流计为什么能测脉冲电荷量？用灵敏电流计能否测量？

6. 根据式(12-20)分析$\frac{\Delta S_\phi}{S_\phi}$的主要误差来源.

7. 用秒表测定的冲击电流计的自由振荡周期 T_0 约为 7s 左右，为了达到 $\Delta\omega_0/\omega_0<0.005$ 的要求，可采用什么办法？

[附记]

冲击电流计三种运动状态的 θ、t_{m1}（第一次最大偏转角所需时间）、θ_m 和 S_ϕ 的推导

求解下列微分方程：

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2}+p\frac{d\theta}{dt}+D\theta=0 \tag{1$'$}$$

初始条件为

$$t=0,\quad \left|\begin{aligned}&\theta|_0=0\\&\left.\frac{d\theta}{dt}\right|_0=\frac{BNS}{J(R_{外}+R_{内})}\int_0^\tau E_{感}\,dt=\frac{G}{J(R_{外}+R_{内})}\int_0^\tau E_{感}\,dt\\&\qquad=\frac{G}{J}\int_0^\tau i\,dt=\frac{G}{J}Q\end{aligned}\right.$$

因此特征方程为

$$Jr^2+pr+D=0$$

$$r_{1,2}=\frac{-p\pm\sqrt{p^2-4JD}}{2J} \tag{2$'$}$$

当 $p^2-4JD<0$ 时，

$$r_{1,2}=-\frac{p}{2J}\pm\frac{\sqrt{4JD}}{2J}\sqrt{1-\frac{p^2}{4JD}}\,\mathrm{j}$$

$$= -\frac{p}{\sqrt{4DJ}}\sqrt{\frac{D}{J}} \pm \sqrt{\frac{D}{J}}\sqrt{1-\frac{p^2}{4JD}}\,\mathrm{j} \quad (\mathrm{j}=\sqrt{-1})$$

令

$$\gamma = \frac{p}{\sqrt{4DJ}},\ \omega_0 = \sqrt{\frac{D}{J}}$$

于是

$$r_{1,2} = -\gamma\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\,\mathrm{j}$$

$$\theta = A\exp(-\gamma\omega_0 t)\sin(\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\,t + B) \tag{3$'$}$$

式中 A 和 B 由初始条件不难定出：

$\theta|_0 = 0 = A\sin B$，因为 $A \neq 0$，所以 $B=0$；

$$\left.\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right|_0 = A\omega_0\sqrt{1-\gamma^2} = \frac{G}{J}\int_0^\tau i\,\mathrm{d}t$$

$$A = \frac{G\int_0^\tau i\,\mathrm{d}t}{J\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}} = \frac{G^2}{(R_{外}+R_{内})}\,\frac{(R_{外}+R_{内})\int_0^\tau i\,\mathrm{d}t}{JG\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}}$$

$$= \frac{p(R_{外}+R_{内})\int_0^\tau i\,\mathrm{d}t}{JG\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}} = \frac{p}{\sqrt{4DJ}}\sqrt{\frac{4D}{J}}\,\frac{\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t}{G\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}}$$

$$= \gamma\,\frac{2\omega_0\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t}{G\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}} = \frac{2\gamma\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t}{G\sqrt{1-\gamma^2}}$$

式中$\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t = (R_{外}+R_{内})\int_0^\tau i\,\mathrm{d}t$，而电量 $Q = \int_0^\tau i\,\mathrm{d}t$.

因此

$$\theta = \frac{2\gamma\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t}{G\sqrt{1-\gamma^2}}\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t}\sin(\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\;t) \tag{4$'$}$$

或

$$\theta = \frac{2\gamma(R_{外}+R_{内})}{G\sqrt{1-\gamma^2}}Q\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t}\sin(\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\;t)$$

为了求 t_{m1} 和 θ_m 先求 $\frac{d\theta}{dt}=0$

$$\frac{d\theta}{dt}=\frac{2\gamma\int_0^{\tau}E_{感}\,dt}{G\sqrt{1-\gamma^2}}\left[-\gamma\omega_0 e^{-\gamma\omega_0 t}\sin(\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\ t)\right.$$

$$\left.+\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}e^{-\gamma\omega_0 t}\cos(\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\ t)\right]=0$$

$$\mathrm{tg}(\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}\ t)=\frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}$$

故

$$t_{m1}=\frac{1}{\omega_0\sqrt{1-\gamma^2}}\ \mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \tag{5}'$$

$$\theta_m=\frac{2\gamma\int_0^{\tau}E_{感}\,dt}{G\sqrt{1-\gamma^2}}\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}}\ \mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right]$$

$$\cdot\sin\left(\mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right)$$

或

$$\theta_m=\frac{2\gamma(R_{外}+R_{内})Q}{G\sqrt{1-\gamma^2}}\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}}\ \mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right]$$

$$\cdot\sin\left(\mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right)$$

令 $\beta=\mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}$，则 $\sin\beta=\sqrt{1-\gamma^2}$

因此

$$\theta_m=\frac{2\gamma\int_0^{\tau}E_{感}\,dt}{G}\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}}\ \mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right] \tag{6}'$$

或

$$\theta_m=\frac{2\gamma(R_{外}+R_{内})}{G}Q\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}}\ \mathrm{arctg}\ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right]$$

因为

$$E_{感}=(R_{外}+R_{内})i=-\frac{d\phi}{dt}$$

所以 $$\Delta\phi = \int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t$$

根据磁通灵敏度的定义

$$S_\phi = \frac{\theta_m}{\Delta\phi} = \frac{\theta_m}{\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t} = \frac{2\gamma}{G}\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}}\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\right] \tag{7$'$}$$

当 $p^2-4JD=0$ 时：

$$r_1 = r_2 = -\frac{p}{2J} = -\frac{p}{\sqrt{4JD}}\sqrt{\frac{D}{J}} = -\gamma\omega_0$$

$$\theta = (A+Bt)\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t}$$

$$\theta|_0 = 0 = A$$

$$\left.\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right|_0 = B\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t}|_0 - Bt\gamma\omega_0\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t}|_0 = \frac{G}{J(R_{外}+R_{内})}\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t$$

所以 $$B = \frac{G}{J(R_{外}+R_{内})}\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t = \frac{G^2}{R_{外}+R_{内}}\frac{\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t}{JG}$$

$$= p\frac{\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t}{JG} = \frac{2p}{\sqrt{4JD}}\sqrt{\frac{D}{J}}\frac{1}{G}\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t$$

$$= \frac{2\gamma\omega_0}{G}\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t$$

故 $$\theta = \frac{2\gamma\omega_0 t}{G}\int_0^\tau E_{感}\,\mathrm{d}t\,\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t}$$

或 $$\theta = \frac{2\gamma\omega_0 t(R_{外}+R_{内})}{G}Q\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t} \tag{8$'$}$$

同样可求得 t_{m1} 和 θ_m. 计算如下

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t} - \gamma\omega_0 t\mathrm{e}^{-\gamma\omega_0 t} = 0$$

$$t_{m1} = \frac{1}{\omega_0} \tag{9$'$}$$

将上式代入(8)′式可得

$$\theta_m = \frac{2\gamma\omega_0}{G\omega_0}\int_0^\tau E_{感}\,dt \cdot e^{-\frac{\gamma\omega_0}{\omega_0}} = \frac{2\gamma}{G}\int_0^\tau E_{感}\,dt \cdot e^{-\gamma}$$

因为 $\gamma = 1$,所以

$$\theta_m = \frac{2}{G}\int_0^\tau E_{感}\,dt \cdot e^{-1}$$

或

$$\theta_m = \frac{2}{G}(R_{外} + R_{内})e^{-1}Q \qquad (10)'$$

$$S_\phi = \frac{\theta_m}{\Delta\phi} = \frac{\theta_m}{\int_0^\tau E_{感}\,dt} = \frac{2}{G}e^{-1} \qquad (11)'$$

当 $p^2 - 4JD > 0$ 时,

$$r_{1,2} = \frac{-p \pm \sqrt{p^2 - 4JD}}{2J} = -\frac{p}{2J} \pm \frac{\sqrt{4JD}}{2J}\sqrt{\frac{p^2}{4JD} - 1}$$

$$= -\frac{p}{\sqrt{4JD}}\sqrt{\frac{D}{J}} \pm \sqrt{\frac{D}{J}}\sqrt{\gamma^2 - 1}$$

$$= -\gamma\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\gamma^2 - 1}$$

$$\theta = e^{-\gamma\omega_0 t}[Ae^{(\omega_0\sqrt{\gamma^2 - 1}t)} + Be^{(-\omega_0\sqrt{\gamma^2 - 1}t)}]$$

$\theta|_0 = 0 = A + B$,即 $A = -B$ 或 $B = -A$,

$$\left.\frac{d\theta}{dt}\right|_0 = 2\omega_0\sqrt{\gamma^2 - 1}\ A = 2\gamma\omega_0\frac{\int_0^\tau E_{感}\,dt}{G}$$

$$A = \frac{\gamma\int_0^\tau E_{感}\,dt}{G\sqrt{\gamma^2 - 1}}$$

$$\theta = \frac{2\gamma\int_0^\tau E_{感}\,dt}{\sqrt{\gamma^2 - 1}G}\text{sh}(\omega_0\sqrt{\gamma^2 - 1}\ t)e^{-\gamma\omega_0 t}$$

或

$$\theta = \frac{2\gamma(R_{外} + R_{内})}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}\frac{Q}{G}\text{sh}(\omega_0\sqrt{\gamma^2 - 1}\ t)e^{-\gamma\omega_0 t} \qquad (12)'$$

由$\frac{d\theta}{dt}=0$整理后得到

$$\text{th}(\omega_0\sqrt{\gamma^2-1}\ t)=\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}$$

因此

$$t_{m1}=\frac{1}{\omega_0\sqrt{\gamma^2-1}}\ \text{arth}\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}$$

$$\theta_m=\frac{2\gamma\int_0^\tau E_{感}\,dt}{G\sqrt{\gamma^2-1}}\text{sh}\left[\text{arth}\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}\right]$$

$$\cdot\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2-1}}\ \text{arth}\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}\right] \quad (13)'$$

令 $\beta=\text{arth}\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}$,即 $\text{th}\,\beta=\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}$

因为 $$\text{th}\,\beta=\frac{\text{sh}\,\beta}{\text{ch}\,\beta}=\frac{\text{sh}\,\beta}{\sqrt{1+\text{sh}^2\,\beta}}=\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma^2}$$

$$\frac{\text{sh}^2\,\beta}{1+\text{sh}^2\,\beta}=\frac{\gamma^2-1}{\gamma^2},\ \text{sh}^2\,\beta=\gamma^2-1$$

所以 $\text{sh}\,\beta=\sqrt{\gamma^2-1}$.

故

$$\theta_m=\frac{2\gamma\int_0^\tau E_{感}\,dt}{G}\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2-1}}\ \text{arth}\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}\right] \quad (14)'$$

或 $$\theta_m=\frac{2\gamma(R_{外}+R_{内})}{G}Q\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2-1}}\ \text{arth}\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}\right]$$

$$S_\phi=\frac{\theta_m}{\Delta\phi}=\frac{\theta_m}{\int_0^\tau E_{感}\,dt}=\frac{2\gamma}{G}\exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2-1}}\ \text{arth}\frac{\sqrt{\gamma^2-1}}{\gamma}\right]$$

(15)′

实验十三　用冲击电流计测电容及高电阻

目的

1. 进一步掌握冲击电流计的原理和使用方法；

2. 学会用比较法测电容，用电容器漏电法测量高阻的阻值以及测量电容器通过高阻的放电曲线.

仪器和用具

冲击电流计、标准电容箱、电压表、直流电源、滑线变阻器、待测电容、待测高阻、电阻箱、停表、开关、导线（两种颜色）等.

原理

冲击电流计是测量脉冲电量的精密仪器，它的基本结构和原理可参看“实验十二冲击电流计特性的研究”.

冲击电流计常量 k_Q 的测定：

测试电路如图 13－1 所示，C_0 为电容器，当充放电开关 K_2 合向 a 侧时，电源给电容充电，电压为 U，则电容器 C_0 的电荷量 Q 等于 $Q=C_0U$；又当充放电开关 K_2 合向 b 侧时，电容器将通过冲击电流计放电，流过电流计的电荷量 Q，使冲击电流计产生 θ_m 的偏转，这第一次偏转角 θ_m 和 Q 成比，又 θ_m 和冲击电流计标尺上光指标的偏移距离 d_m 成比，因而

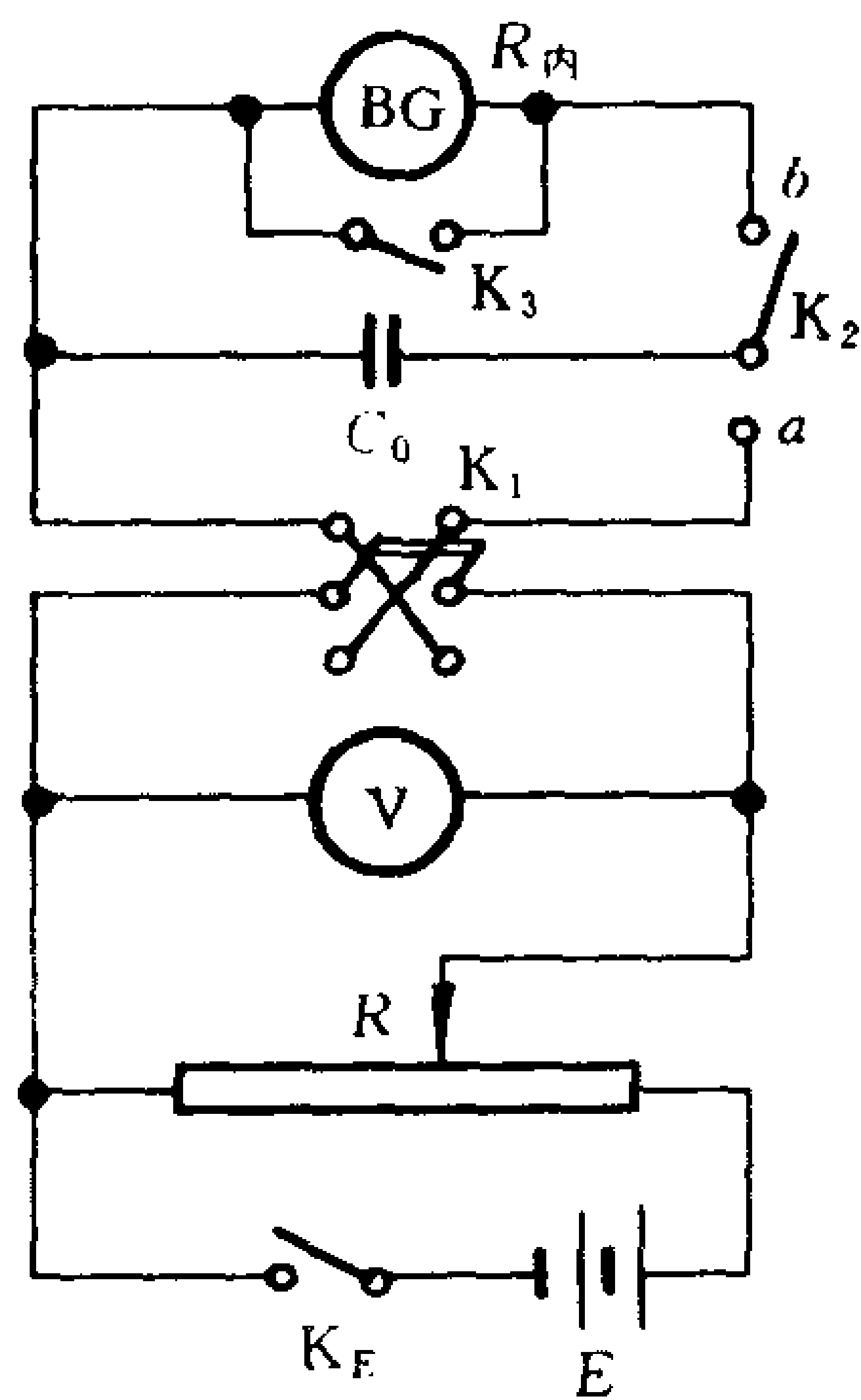


图 13－1　测量 k_Q 的原理图

$$Q = k_Q \cdot d_m \tag{13-1}$$

式中 k_Q 为冲击电流计常量，它表示产生单位偏移距离所需通过的电荷量，单位通常用 C/mm. 已知 $Q = C_0 U$，结合上式可得

$$k_Q = \frac{Q}{d_m} = \frac{C_0 \cdot U}{d_m} \tag{13-2}$$

根据此式，对电容值 C_0 已知的电容器充电后放电，就可求出冲击电流计常数 k_Q. 而若 k_Q 已知，又可根据式(13－1)去测量电量. 但是要注意冲击常量 k_Q 不仅和冲击电流计结构有关，还和电路全电阻及标尺位置有关，即冲击常量 k_Q 仅是电流计在此使用条件下的常量.

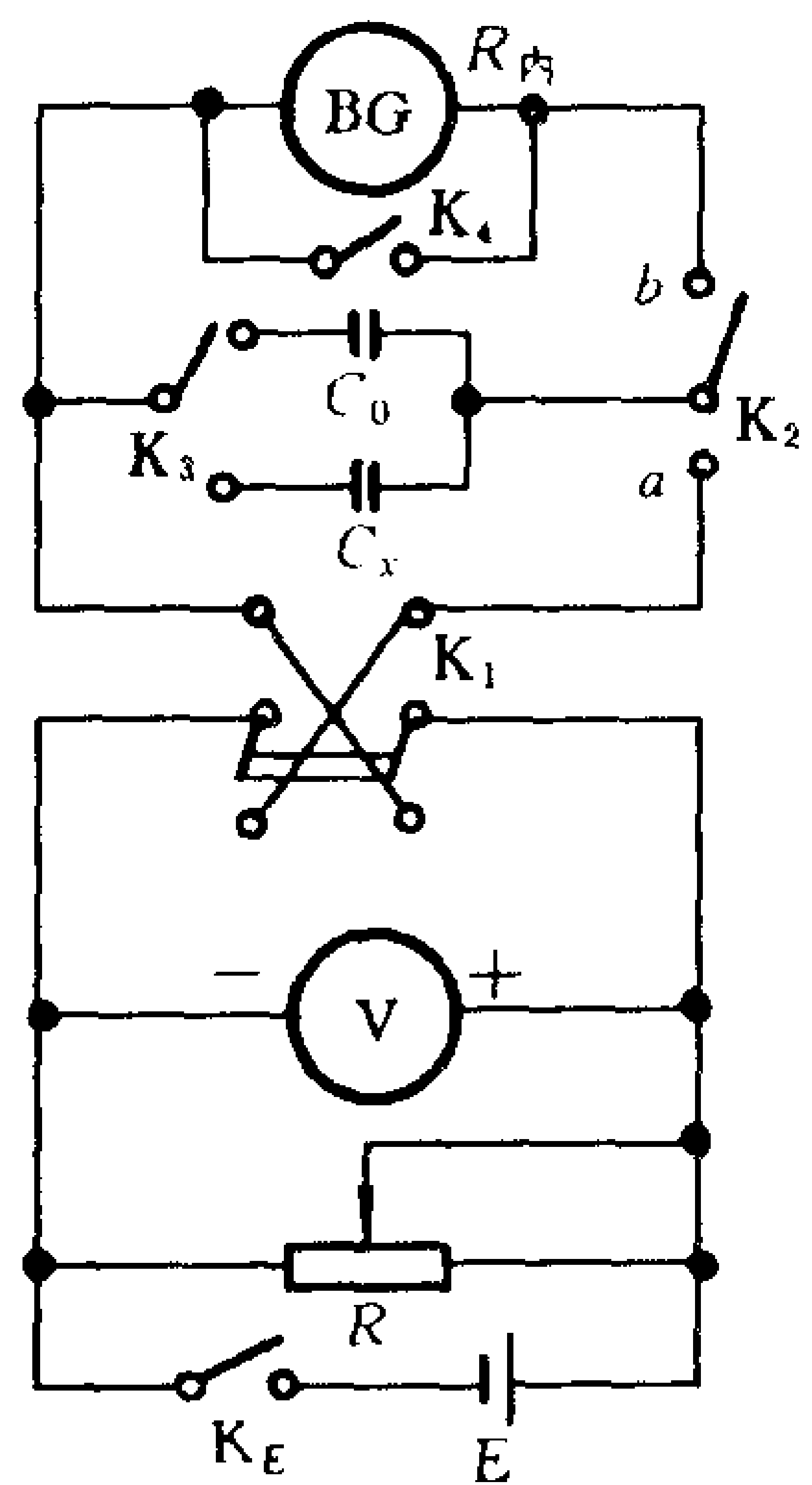


图 13－2 冲击法测电容电路图

1. 比较法测电容

比较法测电容的电路如图 13－2 所示.

将 k_2 合向 a 点，K_3 合向标准电容 C_0，电源对标准电容器充电，充电电荷量为 $Q_0 = C_0 U$；将 K_2 合向 b 端时，由于电容器放电，冲击电流计产生一偏转 d_{m0}，此时标准电容器的放电电荷量为

$$Q_0 = C_0 U = k_Q d_{m0} \tag{13-3}$$

然后将 K_3 合向待测电容 C_x 一边，重复上述步骤，由于电压保持不变，所以

$$Q_x = C_x U = k_Q d_{mx} \tag{13-4}$$

于是由(13－3)、(13－4)式可得

$$C_x = \frac{d_{mx}}{d_{m0}} C_0 \tag{13-5}$$

可见这种测量方法是在保持充电电压不变的条件下，测得冲击电

流计的不同偏转来比较两电容的放电性能，并由已知标准电容和它们的偏转距离来求得被测电容 C_x，由于在测量过程中不需要知道电压 U 及电流计常量 k_Q 的绝对数值，因此就避免了冲击电流计、电压表引起的系统误差. 又因电容放电后冲击电流计的振动主要受空气的阻尼作用，因此可以用第一、第二两次的偏转距离 d_m 和 d'_m 求出对 d_m 的阻尼修正为$(d_m - d'_m)/4$ 即取 $d_m + (d_m - d'_m)/4$ 为第一次偏转距离，以下测量均应按此进行. 又考虑电流计零点不准、悬丝左、右扭转时扭力矩不等、磁场分布不匀等影响，测量时应向左、右各偏转一次，取平均值去计算.

2. 高阻的测量

高电阻一般指 $10^6\ \Omega$ 以上的电阻，非金属材料和有些金属膜的电阻一般都在这个范围，由于惠斯通电桥灵敏度有限，因此对于高电阻不宜也不能作精确测量. 但是用电容器漏电法能比较精确地测量高阻.

测量电路如图 13－3 所示. 将被测电阻 R_x 和已知电容 C_0 并联，先将电容器 C_0 充电，此时电容器所储电荷量为 $Q_0 = C_0 U$，然后将充放电开关 K_2 放在中间位置，使其既不与 a 接触也不与 b 接触，电容器上的电荷量将通过高电阻 R_x 泄漏(故此法称为电容器漏电法)，放电电流(即泄漏电流)为 $i = -\dfrac{dQ}{dR}$(负号表示随着放电时间的增加，电容器极板上的电荷量或电压将随之减少). 在 R_xC_0 串联电路中，根据基尔霍夫定律，

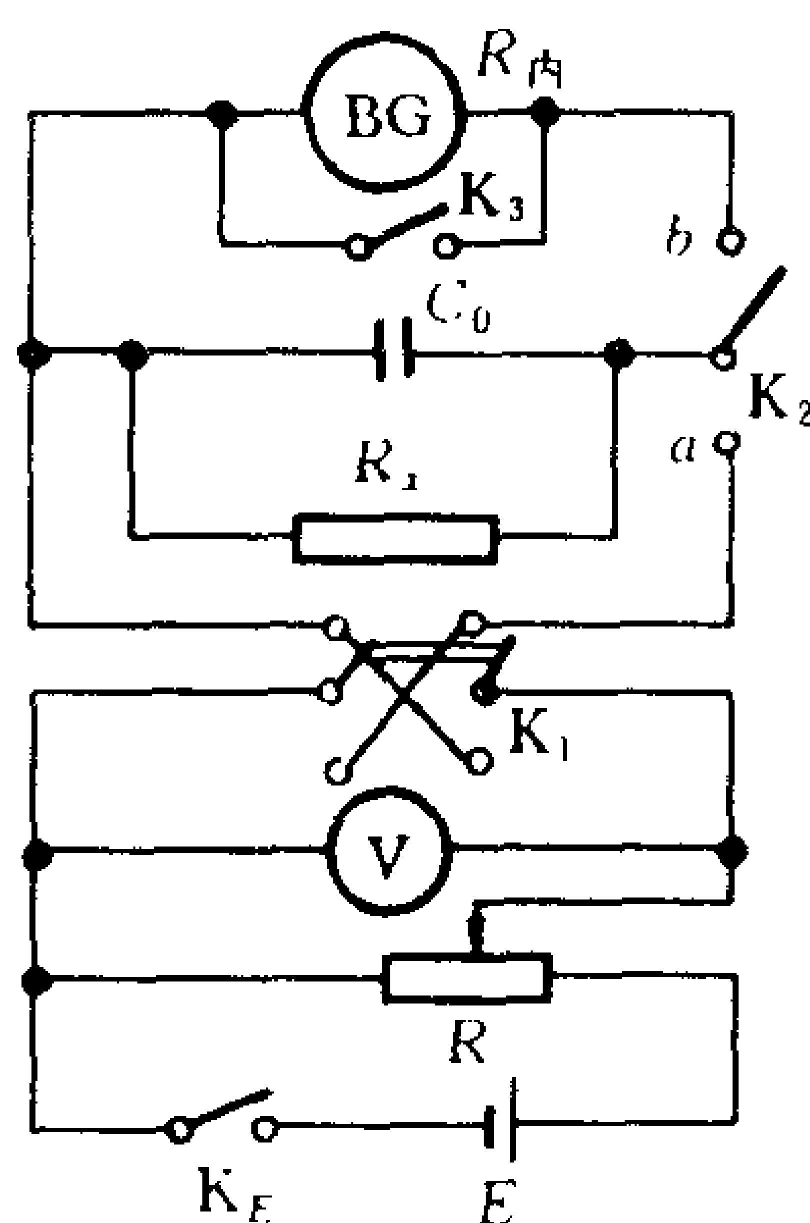


图 13－3　冲击法测高阻电路图

$$iR_x + U = 0,\text{而}\quad U = \frac{Q}{C_0}$$

又
$$i=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$$
因此
$$R_x\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}+\frac{Q}{C_0}=0,\ 即\frac{\mathrm{d}Q}{Q}=-\frac{\mathrm{d}t}{R_xC_0}$$
将上式积分,并应用初始条件 $t=0$ 时,$Q=Q_0$、可得
$$Q=Q_0\mathrm{e}^{-\frac{1}{C_0R_x}}或者 d_{mt}=d_{m0}\mathrm{e}^{-\frac{1}{R_xC_0}} \tag{13-6}$$
两边取对数得
$$\lg d_{mt}=\lg d_{m0}-\frac{t}{R_xC_0}\lg\mathrm{e}$$
$$\lg d_{mt}=-\frac{t}{2.30R_xC_0}+\lg d_{m0} \tag{13-7}$$
式中 d_{m0}、d_{mt} 分别为 $t=0$,$t=t$ 时,电流计的第一次最大偏转距离. 取 $y=\lg d_{mt}$,$x=t$,$a=\lg d_{m0}$,$b=-\frac{1}{2.3R_xC_0}$,则上式为一直线方程 $y=a+bx$,利用绪论§2、§3、§4 中的某一方法,解出斜率 b,则未知电阻
$$R_x=-\frac{1}{2.30bC_0} \tag{13-8}$$

实验内容

1. 冲击常量的测定

按图 13-1 接好线路,先使 K_2 和 a、b 都断开,调节分压器 R,使电压表有一合适值,其大小由电容器放电时冲击电流计有适当的偏转值来决定,K_2 合向 a 端对电容 C_0 充电,其电荷量为 $Q_0=C_0U$,然后合向 b,对冲击电流计 BG 放电,使冲击电流计偏转为 d,最后根据测量结果算出 $k_Q=\frac{UC_0}{d}$ 值. 取三种不同的 C_0 和 U 值,求冲击电流计常量 k_Q 的算术平均值并估计误差.

2. 比较法测电容器的电容量

按图 13－2 接好线路，将 K_3 与 C_x 相连，调节分压器 R，适当改变输出电压，以使电容器放电时冲击电流计有较大的偏转，将 K_2 合向 a，对电容器充电，然后将 K_2 合向 b，电容器对冲击电流计放电，测得 d_x. 再将 K_3 与 C_0 相连，注意：R 和 U 保持不变，调节标准电容箱，选择合适的 C_0 值，尽量使 d_x 与 d_0 之比接近于 1，则待测电容值为

$$C_x = \frac{d_x}{d_0} C_0 \tag{13-9}$$

按上述原理测未知电容 C_x 和 C_0、C_x 的串、并联值.

令 $U = 3.00$ V，测出冲击电流计分别对 C_x 及 C_x、C_0 串、并联时偏转值 d_x、$d_{串}$、$d_{并}$，则由公式(13－9)可算出它们的电容值.

3. 冲击法测量高阻值

按图 13－3 接好线路，将 K_2 接到 a 端，对 C_0 充电，然后将充电开关与 a 断开并保持在中央位置，同时开始计时，t(秒)后 K_2 和 b 相接，测得偏转距离为 d_t，这样得到(t, d_t)一组数值；选择几个不同的 t 值，得到 n 组不同的值，求得 R_x 值(要求 $n \geqslant 10$).

如果以时间 t 为横坐标，电荷量 Q_t ($= k_Q d_t$)为纵坐标，则可画出一条 $R_x C_0$ 的放电曲线，如图13－4所示. 在图上找出 Q_t =

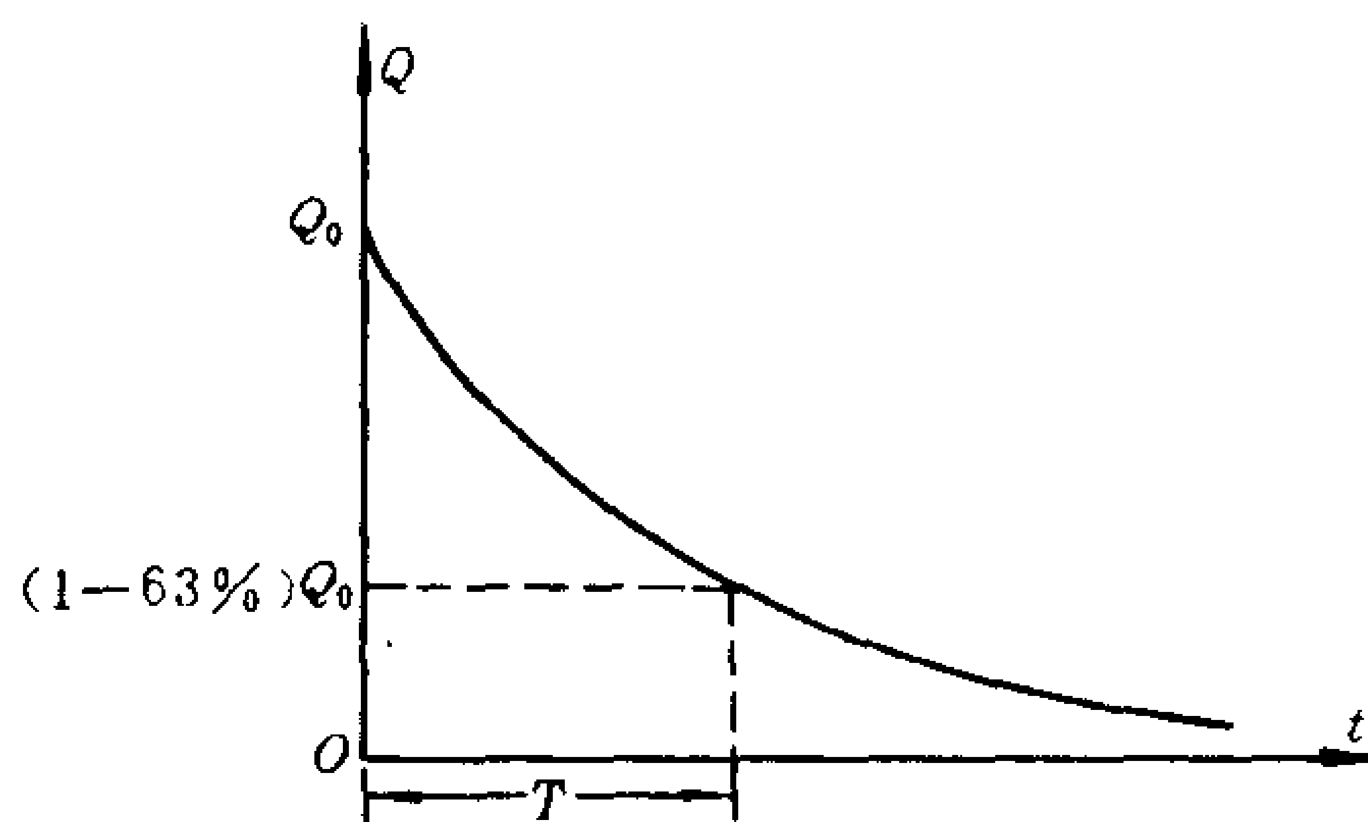


图 13－4 电容器放电曲线

$(1-63\%)Q_0$ 的点，它在 t 轴上对应的时间即为实验 τ 值. 或者用二个变量统计方法计算 $\lg d$ 和 t 的相关系数和回归常量，根据

$$b = -\frac{1}{2.30R_xC_0} = -\frac{1}{2.30\tau}$$

求得

$$\tau = \frac{-1}{2.30b} \tag{13-10}$$

最后算出和理论 τ 值（$\tau = R_xC_0$）的相对误差. 由 τ 值可算出

$$R_x = \frac{\tau}{C_0} \tag{13-11}$$

4. 电容器漏电阻的测量

由于电容器两极间不能完全绝缘，故存在漏电阻. 设计测量一电容器的漏电阻值的电路.

测量时必需注意：

1. 应考虑空气阻尼的修正，冲击电流计的第一次最大的偏转距离值 $d = d_1 + \frac{d_1 - d_2}{4}$.

式中 d_1 为冲击电流计第一次偏转极大值；d_2 为在标尺同一侧第二次偏转极大值.

2. 为了消除冲击电流计零点的不准，及悬丝左右扭力矩不相等的系统误差，用电路中的换向开关 K_1，使冲击电流计向左、右偏转，各测一次取平均.

综合上述二点要求，冲击电流计第一次最大偏转距离值应为

$$d = \frac{d_{左} + d_{右}}{2} = \frac{\left(d_{左1} + \frac{d_{左1} - d_{左2}}{4}\right) + \left(d_{右1} + \frac{d_{右1} - d_{右2}}{4}\right)}{2}$$

预习思考题

1. 冲击电流计的电量常量 k_Q 的物理意义是什么？为什么要测量冲击电流计的灵敏度 S_Q（或电量常量 k_Q）？

2. 怎样用测得的电量常量 k_Q 来测量未知电容器上所带的电荷量 Q_x 和电容值？

3. 采用冲击电流计通过比较法测电容有什么优缺点？

4. 为什么左、右两边测量偏转值？如何修正空气阻尼的影响？冲击电流计第一次最大偏转距离值应如何测量？又如何计算？

复习思考题

1. 本实验所测定的电量灵敏度 S_Q（或冲击常量 k_Q）是最大值还是最小值？为什么？

2. C_x 的测量中主要的偶然误差的来源是什么？C_0 应该取什么值较为合适？

3. 为什么要用冲击法测高阻？而不用伏安法、电势差计法测高阻？

4. 从冲击电流计用电容漏电法测高阻所得的放电曲线说明电容器的充放电符合什么规律？如何证明？

5. 本实验所测得的冲击常量其对应的阻尼度约为多大？冲击电流计处于什么运动状态？

实验十四　用冲击电流计测螺线管内轴线上磁场的分布

目的

1. 学习用冲击法测磁感应强度的原理和方法；
2. 掌握冲击电流计的使用方法.

仪器和用具

冲击电流计、螺线管、标准互感器、电阻箱、滑线变阻器、直流安培表、直流电源、开关等.

原理

当螺线管通以电流 I 时，则管内轴线上任意一点的磁感应强度为

$$B=\frac{1}{2}\mu_0 n_0 I(\cos\beta_1-\cos\beta_2) \tag{14-1}$$

式中 μ_0 为真空磁导率，n_0 为单位长度线圈的匝数，β_1、β_2 分别为螺线管轴上某一点到两端的张角，如图 14-1 所示. 当螺线管为无限长时（$\beta_1=0,\beta_2=\pi$），则磁感应强度

$$B_0=\mu_0 n_0 I$$

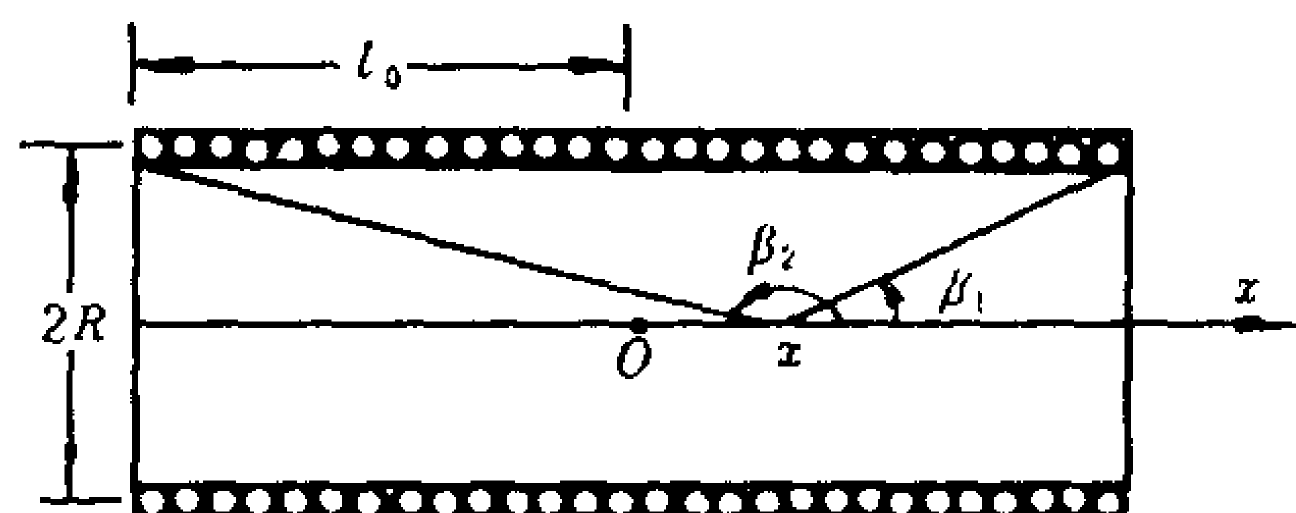


图 14-1　螺线管

如果螺线管的长度为 $2l_0$，直径为 $2R$，取螺线管的中点 O 为 x 轴的原点，那么(14-1)式可写作

$$B=\frac{1}{2}\mu_0 n_0 I\left[\frac{l_0-x}{\sqrt{R^2+(l_0-x)^2}}+\frac{l_0+x}{\sqrt{R^2+(l_0+x)^2}}\right] \quad (14-2)$$

令 $\frac{R}{l_0}=m$，$\frac{x}{l_0}=n$ 而 $B_0=\mu_0 n_0 I$，则(14-2)式可写成

$$B=\frac{1}{2}B_0\left[\frac{1-n}{\sqrt{m^2+(1-n)^2}}+\frac{1+n}{\sqrt{m^2+(1+n)^2}}\right] \quad (14-3)$$

或

$$\frac{B}{B_0}=\frac{1}{2}\left[\frac{1-n}{\sqrt{m^2-(1-n)^2}}+\frac{1+n}{\sqrt{m^2+(1+n)^2}}\right] \quad (14-4)$$

以 n 为横坐标、$\frac{B}{B_0}$ 为纵坐标，如果取三种 m 值，则按(14-4)式得到的轴线上相对磁场分布如图 14-2 所示(详细数据见附记).

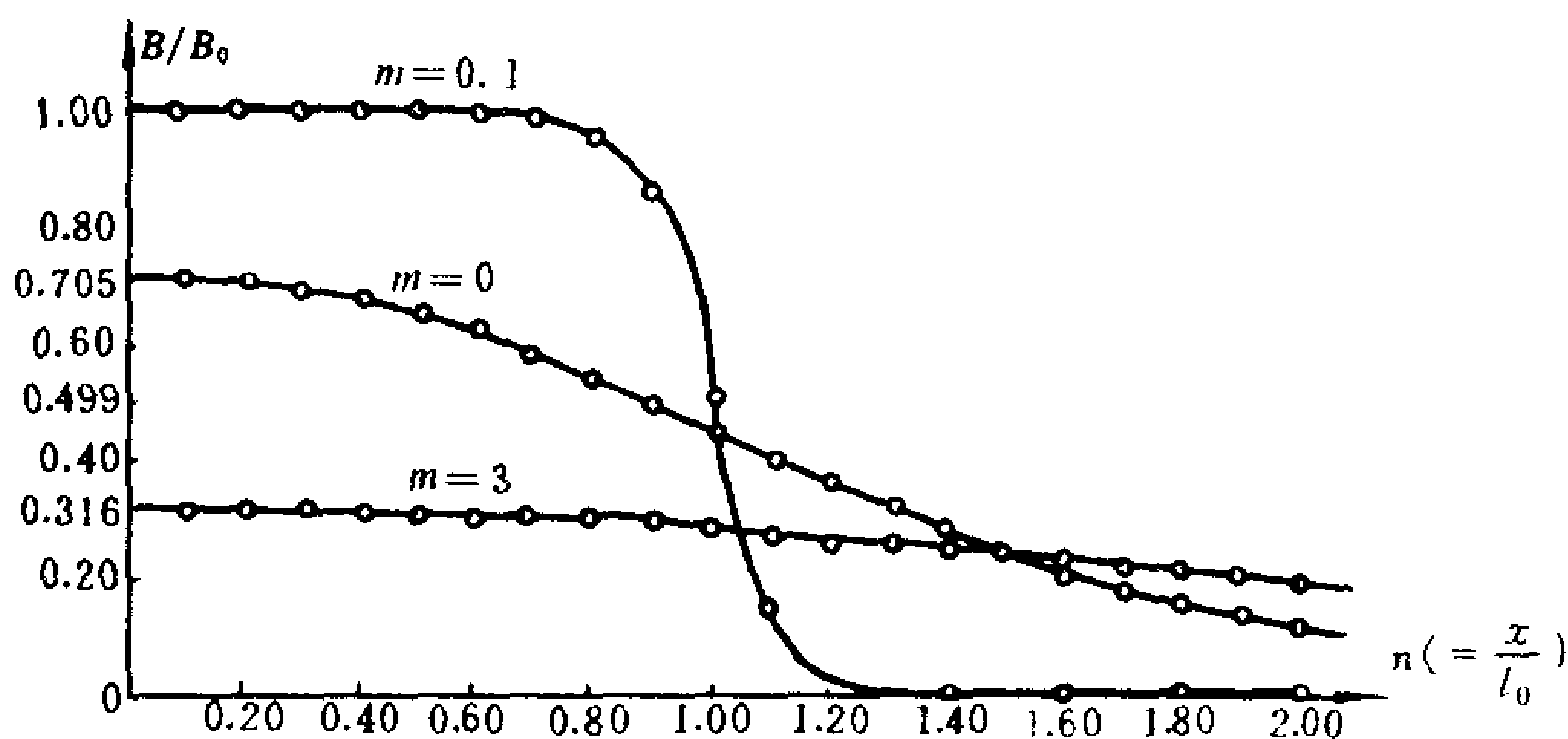


图 14-2 螺线管磁场分布图

由图可知 m、n 值越小、磁场越均匀，当 $l\gg R$，即 $m\to 0$ 时，在 $x=l_0$(即 $n=1$)处，$\frac{B}{B_0}=\frac{1}{2}$，即螺线管口的场强等于中间场强的一半$\left(x=0\text{ 时},\frac{B}{B_0}=1\right)$.

用冲击法测稳定磁场是磁测量中常用的方法，本实验是用冲击电流计测定磁感应强度 B，从而验证公式(14－4). 测定磁感应强度的线路如图 14－3 所示. 图中 BG 为冲击电流计，M 为标准互感线圈，T 为待测螺线管，K_1 为换向开关，K_2 为双刀双掷开关.

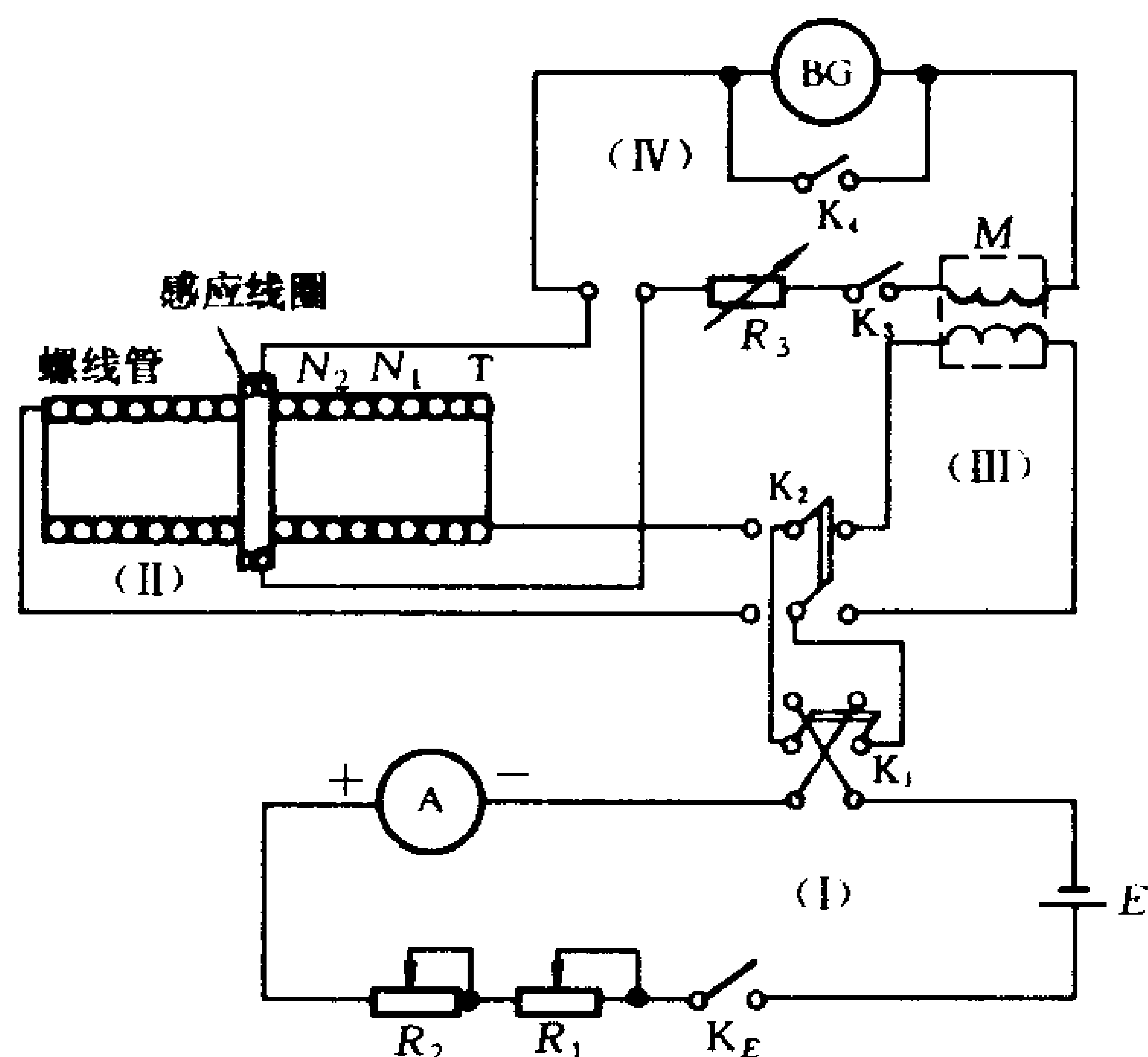


图 14－3　磁感应强度测试线路图

它由四部分回路组成：(Ⅰ)直流电流供给电路，(Ⅱ)磁场电路，(Ⅲ)电流计常量测定电路，(Ⅳ)测量电路. 当 K_2 倒向右边和标准互感器相接时，将换向开关 K_1 换向，则磁通量变化为

$$\Delta\phi = 2MI_0$$

式中 M 为标准互感器的互感系数，单位为亨利. I_0 为通过标准互感器初级线圈的电流，由电流表读出，单位为安培. 当测出冲击电流计第一次最大偏转距离 d_m 时，就可测定冲击电流计的磁通灵敏度 S_ϕ：

$$S_\phi = \frac{d_m}{\Delta\phi} = \frac{d_m}{2MI_0} \qquad (14-5)$$

实际上常用它的倒数——磁通冲击常量 k_ϕ 来描述，即

$$k_\phi = \frac{1}{S_\phi}$$

同理将 K_2 倒向左边与螺线管相连时(注意:R_3 电阻值不能改变,以保持磁通冲击常数的恒定),将换向开关 K_1 换向,则磁通量的变化值为

$$\Delta\phi = 2BN_2S$$

式中 N_2 和 S 分别为螺线管次级线圈的匝数和面积,B 为磁感应强度. 根据磁通灵敏度定义

$$S_\phi = \frac{d_m}{\Delta\phi} = \frac{d_m}{2BN_2S}$$

则

$$B = \frac{d_m}{2N_2SS_\phi} = \frac{k_\phi d_m}{2N_2S} \tag{14-6}$$

如果 N_2、S 和 k_ϕ 都已知,根据此时从冲击电流计测出的最大偏转距离 d_m,就可求得磁感应强度 B. 注意:N_2 和 S 都是常量. $k_\phi = \frac{2MI}{d_m}$. 如果令 $x=0$(即磁场感应线圈 N_2 的位置在螺线管中点位置)的冲击电流计偏转距离为 d_0 则可得螺线管中心处的磁感应强度 B_0 为

$$B_0 = \frac{k_\phi d_0}{2N_2S}$$

$$\frac{B_0}{d_0} = \frac{k_\phi}{2N_2S} = 常量$$

而在 x 处的磁感应强度为

$$B = \frac{k_\phi d_x}{2N_2S} = \frac{B_0}{d_0}\ d_x$$

上式也可改为

$$\frac{B}{B_0} = \frac{d_x}{d_0} \tag{14-7}$$

即由测得的偏转距离也可测出磁场的相对分布.

实验内容

1. 磁通冲击常量 k_ϕ 的测定

见图 14－3,将双刀双掷开关 K_2 和回路Ⅲ接通,开始取 R_1、R_2 为最大阻值,接通电源后,调节 R_1 和 R_2,保证安培表的示数 I_0 小于标准互感器的额定电流,调节 R_3,将开关 K_1 换向,测量冲击电流计的偏转距离 d_m,使其有较大的偏转距离.通常冲击电流计工作在过阻尼状态,因而冲击电流计的磁通灵敏度较高,将 K_1 先后换向二次,因而得到一次左偏值 $d_{m左}$,一次右偏值 $d_{m右}$,取其平均值 d_m,保持冲击电流计回路电阻不变的条件下取 3～5 种不同的电流值,测出对应的 d_m 值.分别算出冲击电流计常量,并计算它的平均值,并计算不确定度.

2. B_0 的测定

将双刀双掷开关 K_2 和回路Ⅱ接通,并使感应线圈放在螺线管中心处,接通电源,调节 R_1 和 R_2 于合适位置,使 K_1 换向时冲击电流计有较大的偏转距离,注意:此时千万不能改变 R_3 值(考虑一下为什么?)!用米尺测出螺线管长度 $2l_0$,用游标尺测出它的直径(2R),因此 $m=\left(\frac{2R}{2l_0}=\frac{R}{l_0}\right)$可以计算出来,记下 l_0、N_2 和 S 值,根据(14－5)式可以计算 B_0 值.

3. 测螺线管内轴线上磁场的分布

将感应线圈(或称为试探线圈)从中心位置开始,向任意一方端点逐点移动,取 $n\left(=\frac{x}{l_0}\right)$为 0.20、0.40、0.60,0.80,0.90,1.00,1.20,1.40 和 1.60 等值,测量一种 n 值的 d_m 值.注意:测量时 R_1、R_2 和 R_3 都不能更动(考虑一下为什么?).

将实验条件的 m 值和测量的各种 n 值代入(14－4)式得到

$$\frac{B}{B_0}=\frac{1}{2}\left(\frac{1-n}{\sqrt{m^2+(1-n)^2}}+\frac{1+n}{\sqrt{m^2+(1+n)^2}}\right)$$

计算值,又各 n 值所测的偏转值代入(14－7)式可得到$\frac{B}{B_0}$的实验值:

$$\frac{B_x}{B_0}=\frac{d_x}{d_0}$$

以 n 为横坐标,分别以$\frac{B}{B_0}$的理论值和实验值为纵坐标,作$\left(\frac{B_x}{B_0}\right)_{理}-n$ 曲线和$\left(\frac{B_x}{B_0}\right)_{实}-n$ 曲线,进行比较.

预习思考题

1. 当 $m\gg1$ 和 $m\to0$ 时螺线管轴向磁场的分布是否相同?
2. 怎样测定冲击常数 k_ϕ? R_3 对它有否影响?
3. 怎样用冲击电流计测磁感应强度?
4. 为什么测螺线管内轴向磁场分布时不能改变 R_1、R_2 和 R_3 值?

复习思考题

1. 为什么在测冲击常量 k_ϕ 与 B 时,标准互感器的次级线圈与试探线圈始终要和冲击电流计串联在一起? 能否分别与冲击电流计相连进行测量? 为什么?

2. 是否可以通过 R_1 和 R_2 的改变来选取冲击电流计的工作状态和灵敏度?

3. 将测定结果即螺线管中部与端口部的磁感应强度与理论值计算的结果相比较,并分析误差产生的原因.

4. 需设计一螺线管,要求轴心磁场均匀的范围要大些,螺线管的尺寸大小应如何选择? $m\left(=\frac{R}{l}\right)$的值应选得大还是小好?

[附记]

$$\frac{B}{B_0}=\frac{1}{2}\left(\frac{1-n}{\sqrt{m^2+(1-n)^2}}+\frac{1+n}{\sqrt{m^2+(1+n)^2}}\right)$$的数据计算表

$\frac{B}{B_0}$ m \ n	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.10	0.995	0.995	0.994	0.994	0.992	0.989	0.984	0.973	0.946	0.853	0.499
1.00	0.707	0.704	0.696	0.683	0.664	0.640	0.610	0.575	0.535	0.492	0.447
3.00	0.316	0.316	0.315	0.312	0.310	0.306	0.301	0.296	0.291	0.284	0.277

$\frac{B}{B_0}$ m \ n	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
0.10	0.146	0.052	0.025	0.014	0.009	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002
1.00	0.402	0.357	0.315	0.276	0.241	0.209	0.182	0.159	0.138	0.121
3.00	0.270	0.262	0.254	0.246	0.238	0.229	0.221	0.212	0.204	0.195

实验十五　用冲击电流计测铁磁物质的磁化曲线

目的

1. 学会用冲击电流计测磁感应强度；
2. 掌握测定磁化曲线的方法.

仪器和用具

冲击电流计、电阻箱、电流表、滑线变阻器、直流电源、调压变压器、待测磁环、开关等.

原理

若在有铁芯的螺绕环中通以磁化电流 I，则铁芯中的磁场强度为

$$H=\frac{N_1}{l_0}I \qquad (15-1)$$

式中 N_1 和 l_0 分别为螺绕环的初级线圈匝数和平均周长. 如图 15－1 所示. 对应的磁感应强度

$$B=\mu H \qquad (15-2)$$

式中 μ 为铁磁物质的磁导率，它不是常量，因此 B 和 H 之间的关系通常是复杂的. 图 15－2 表示当磁化电流反复磁化时，铁芯中的 B 和 H 之间的关系.

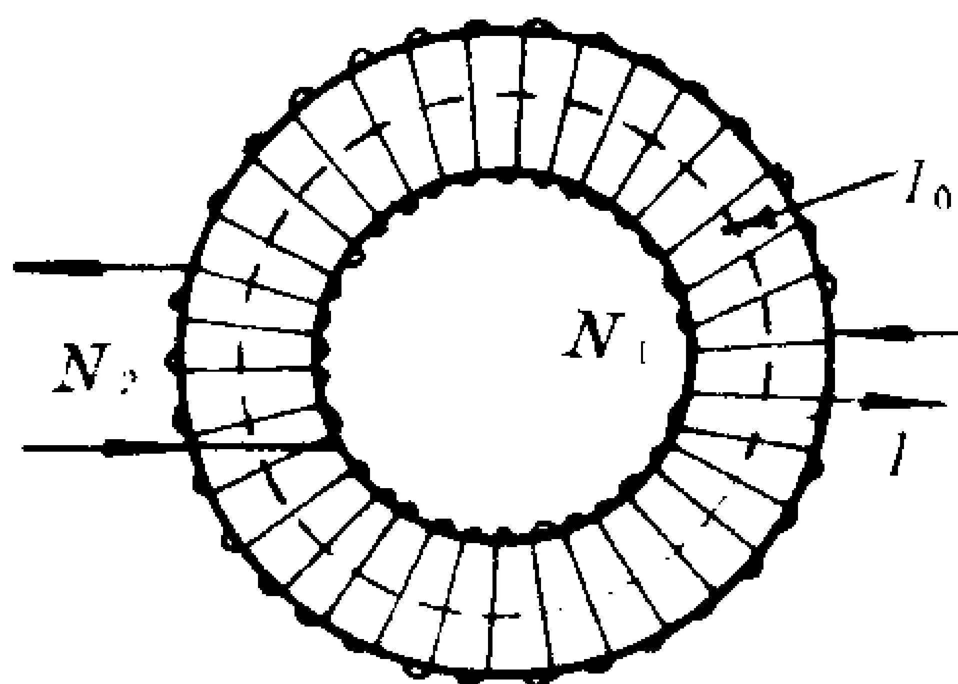


图 15－1　螺绕环

设开始时线圈中的电流为零，铁芯处于未磁化状态，即 $H=0$，$B=0$，对应于图中的坐标原点. 当

磁化电流逐渐增大时，根据(15－1)式，H 值也随之增加，B 和 H 的变化关系可用曲线 Ob_1 表示，这条曲线称为起始磁化曲线，当达到 b_1 点时，令相应的磁化电流为 I_{m0}，磁场强度为 $+H_{m0}$ 和磁感

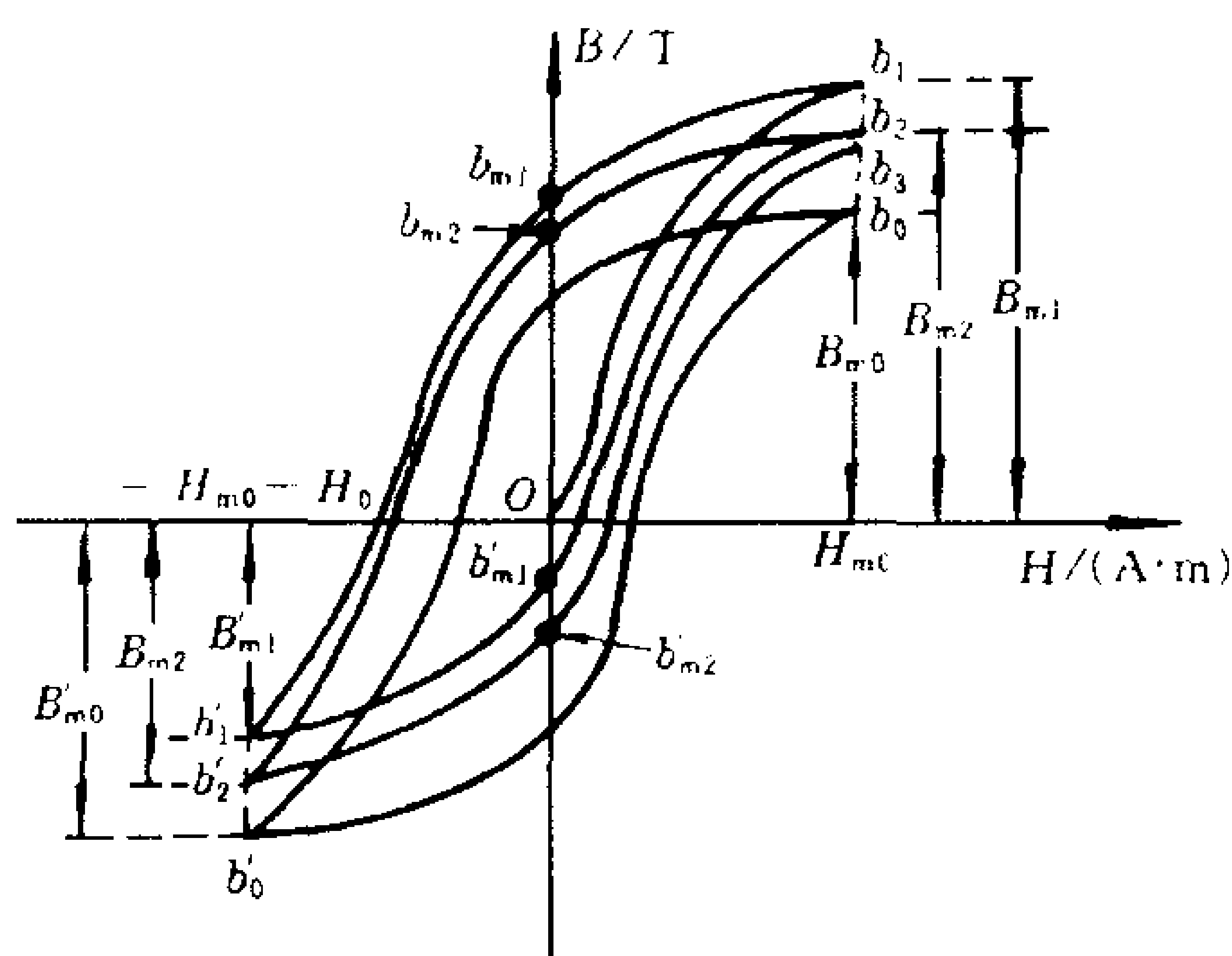


图 15－2　铁磁体的磁化过程

应强度为 B_{m1}；当磁化电流逐渐减小至零($H=0$)时，发现 $B\neq 0$，而是 $B=b_{m1}$，"b_{m1}"称作"剩磁"．要将剩磁去掉必须加反向外磁场；当磁化电流反向增加时，B 从 b_{m1} 逐渐退到零，这时由这种反向磁化电流产生的磁场强度 $-H_0$ 称作"矫顽力"；若反向磁化电流继续增加变为 $-I_{m0}$ 时，磁场强度变为 $-H_{m0}$，铁芯从 b_1 状态变为 b'_1 状态，其磁感应强度从 B_{m1} 变为 B'_{m1}，由于剩磁 b_{m1} 的作用，致使 $|B_{m1}|\neq|B'_{m1}|$，通常 $|B'_{m1}|<|B_{m1}|$；如果磁场的变化为从 $-H_{m0}\to 0\to +H_{m0}$ 时，铁芯从 b'_1 状态变为 b_2 状态，同样由于克服剩磁 b'_{m1} 的作用，使 $|B_{m2}|<|B_{m1}|$，可见曲线并不闭合，如果再度使磁场从 $+H_{m0}\to 0\to -H_{m0}$，铁芯处于 b'_2 状态，对应的磁感应强度为 B'_{m2}，同样，由于克服剩磁 b_{m2} 的作用以及由于 $b_{m2}<b_{m1}$，所以 $|B'_{m2}|>|B'_{m1}|$．于是，当反复磁化时可得到：

$$B_{m1}>B_{m2}>\cdots>B_{m0}；|B'_{m1}|<|B'_{m2}|\cdots<|B'_{m0}|$$

以上情况说明对于同一外磁场 H_m，由于磁化历史不同剩磁

也不同,对应的 B_m 值也不同,所以 B_m 不是 H_m 的单值函数,只有经过多次循环磁化后,直到 $|B_{m0}| = |B'_{m0}|$,对应于 H_{m0} 的 B_m 值才最终稳定在 B_{m0} 值,这样 B 和 H 才有唯一对应的关系,这样才可得到一条闭合的回线,这条回线称为磁滞回线.

此曲线和原点中心对称,不同的 I 值即不同外磁场值所对应的回线大小也不同. 在磁测量中,进行反复磁化过程的操作称为"磁锻炼",所得到的一系列振幅不同的磁滞回线端点轨迹的连线,称为基本磁化曲线. 如图 15-3 所示.

磁感应强度 B 的测定方法:

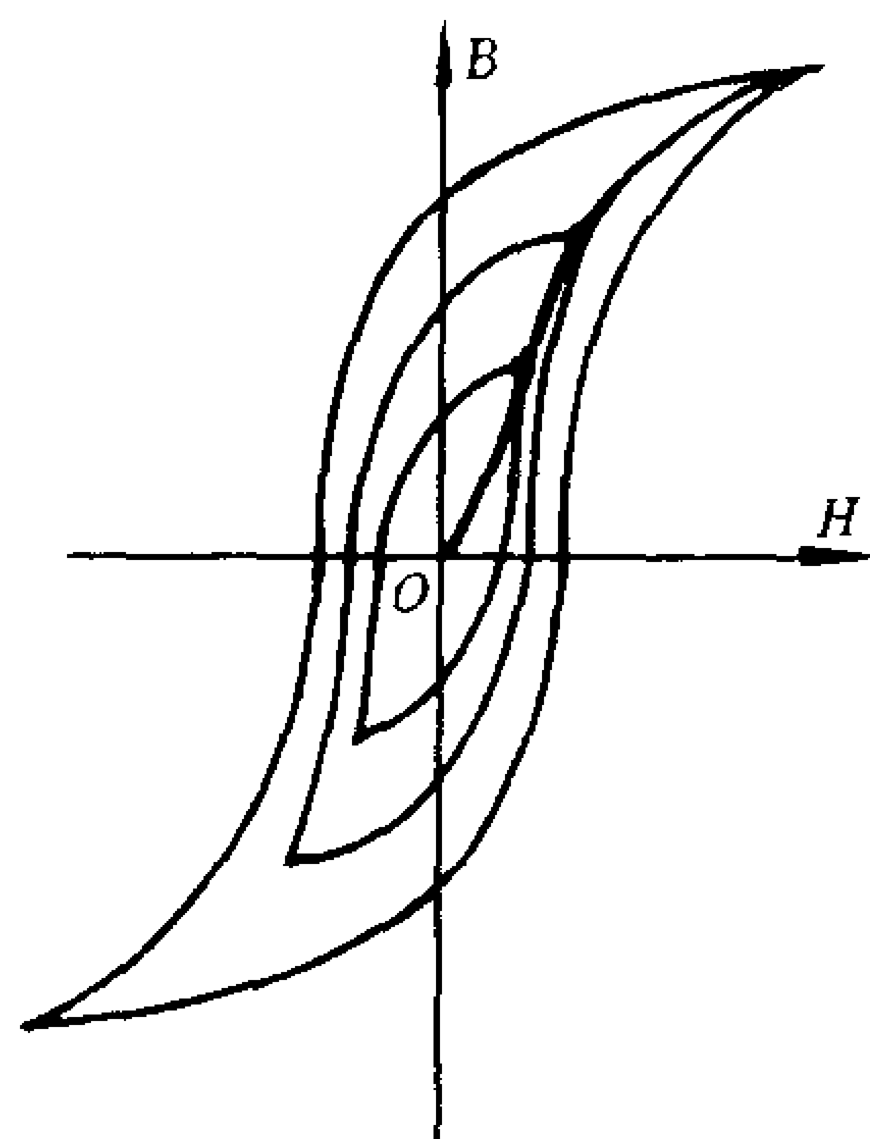


图 15-3 基本磁化曲线

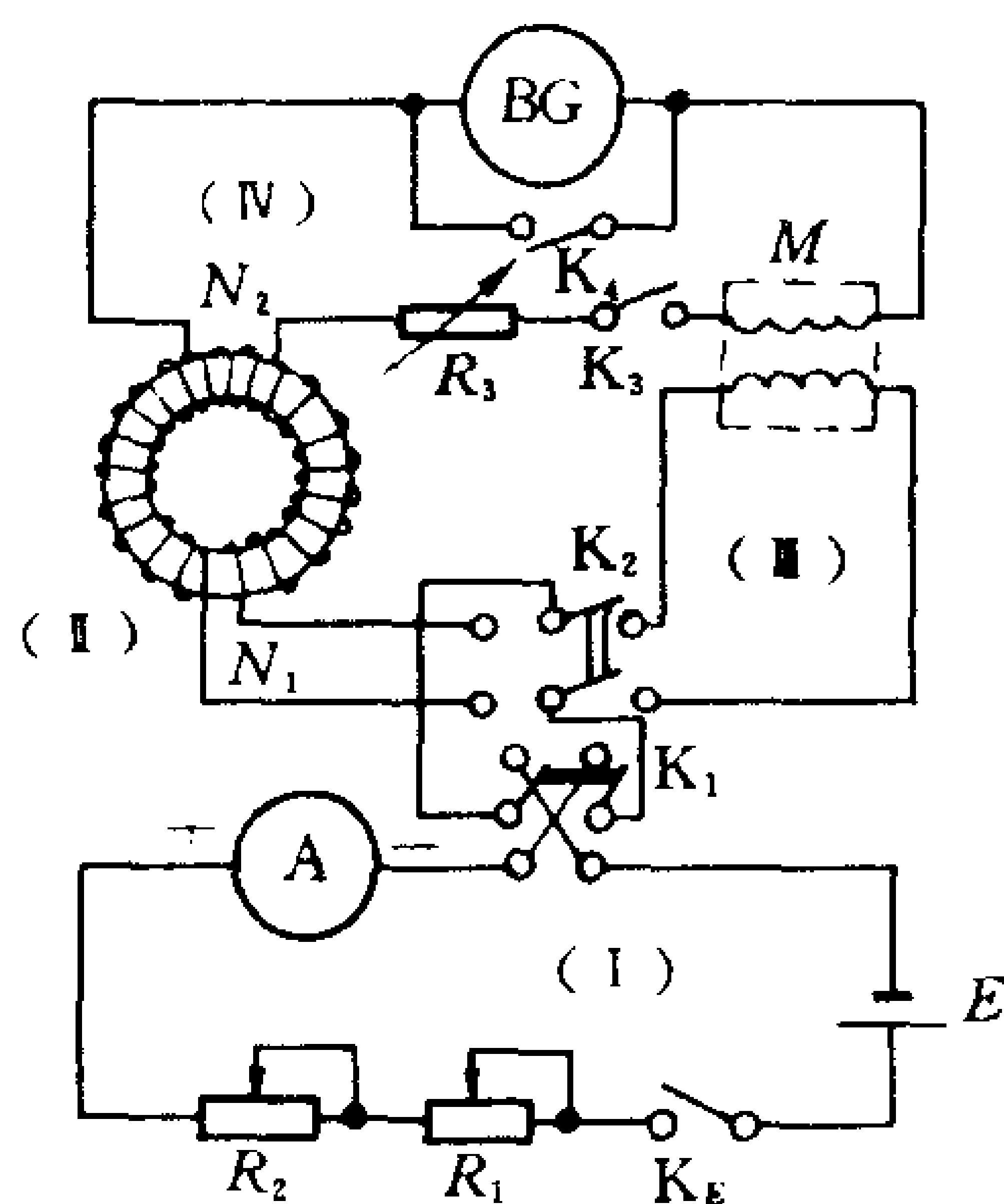


图 15-4 测试磁感应强度线路图

测试线路如图 15-4 所示. 它由四个回路组成:

1. 直流电流供给电路(Ⅰ)

改变 R_1、R_2 的阻值,可得到大小不同的磁化电流;

2. 磁化电路(Ⅱ)

当开关 K_2 接到螺绕环一边,回路(Ⅰ)与(Ⅱ)相连,接通电源,电流则流经螺绕环,产生磁化样品的磁化场.

3. 电流计常数测定电路(Ⅲ)

当 K_2 接到标准互感器 M 一边,回路(Ⅰ)与(Ⅲ)相连,电流

流过标准互感器的初级线圈，构成测定电流计常量或磁通灵敏度电路.

4. 测量电路(Ⅳ)

调节 R_3，可以改变冲击电流计的工作状态，当 K_2 接到回路(Ⅲ)，将换向开关 K_1 换向，可定出冲击电流计常量；当 K_2 接到回路(Ⅱ)，将换向开关 K_1 换向可测定螺绕环铁芯的磁感应强度.

当 K_2 倒向右边和标准互感器相接时，可以测定冲击电流计的磁通灵敏度(见"实验十二冲击电流计特性的研究")

$$S_\phi = \frac{d_m}{\Delta\phi} = \frac{d_m}{2MI_0}\text{(单位为毫米每韦伯)}. \qquad (15-3)$$

式中 M 为标准互感器的互感系数，单位为亨利. I_0 为流过 M 初级线圈的电流值，单位为安培，可由安培表读出. d_m 为冲击电流计第一次的最大偏转距离，单位用毫米. 改变 R_3 将改变冲击电流计的阻尼状态，也将改变磁通灵敏度，因此只要 R_3 值不变，S_ϕ 便是常量，它的物理意义就是磁通量变化 1 Wb 所引起冲击电流计最大的偏转距离值. 实际上常用磁通冲击常量 k_ϕ 来描述，它与 S_ϕ 的关系为

$$k_\phi = \frac{1}{S_\phi}\text{(单位为韦伯每毫米)} \qquad (15-4)$$

即冲击电流计偏转 1 mm 所需要的磁通量变化值. 若将 K_2 倒向左边与螺绕环线圈相连(注意：R_3 值不能改变，以保持 S_ϕ 值恒定)，然后将 K_1 换向，则磁通量的变化值

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \qquad (15-5)$$

已知 $\phi_1 = BSN_2$，当 K_1 换向时，$\phi_2 = -BSN_2$，冲击电流计偏转距离为 d_m. 式中 N_2、S 分别为螺绕环次级线圈的匝数和面积，B 为磁感应强度，因此

$$\Delta\phi = 2BN_2S$$

根据磁通灵敏度的定义

$$S_\phi = \frac{d_m}{\Delta\phi} = \frac{d_m}{2BN_2S}$$

变换后得

$$B = \frac{d_m}{2S_\phi N_2 S} = \frac{k_\phi d_m}{2N_2 S} \tag{15-6}$$

如果 N_2、S 和 k_ϕ 都已知,那么根据第一次的最大偏转值 d_m 就可求得磁感应强度 B.

为了减少冲击电流计的系统误差,偏转值取左、右两次的平均值,然后代入(15-6)式计算.

退磁:由于铁磁物质内部的磁感应强度 B 和材料本身以前的磁化历史有关,因此在测磁化曲线之前必须将材料已有磁性消除,即所谓退磁. 退磁的方法是先使磁化电流达到磁饱和电流,然后不断使磁化电流反向,同时逐渐减少其数值,直到零值为止. 在退磁过程中,材料的磁感应强度 B 随 H 变化的情形如图 15-5 所示. 退磁的方法可采用直流退磁,也可采用交流退磁.

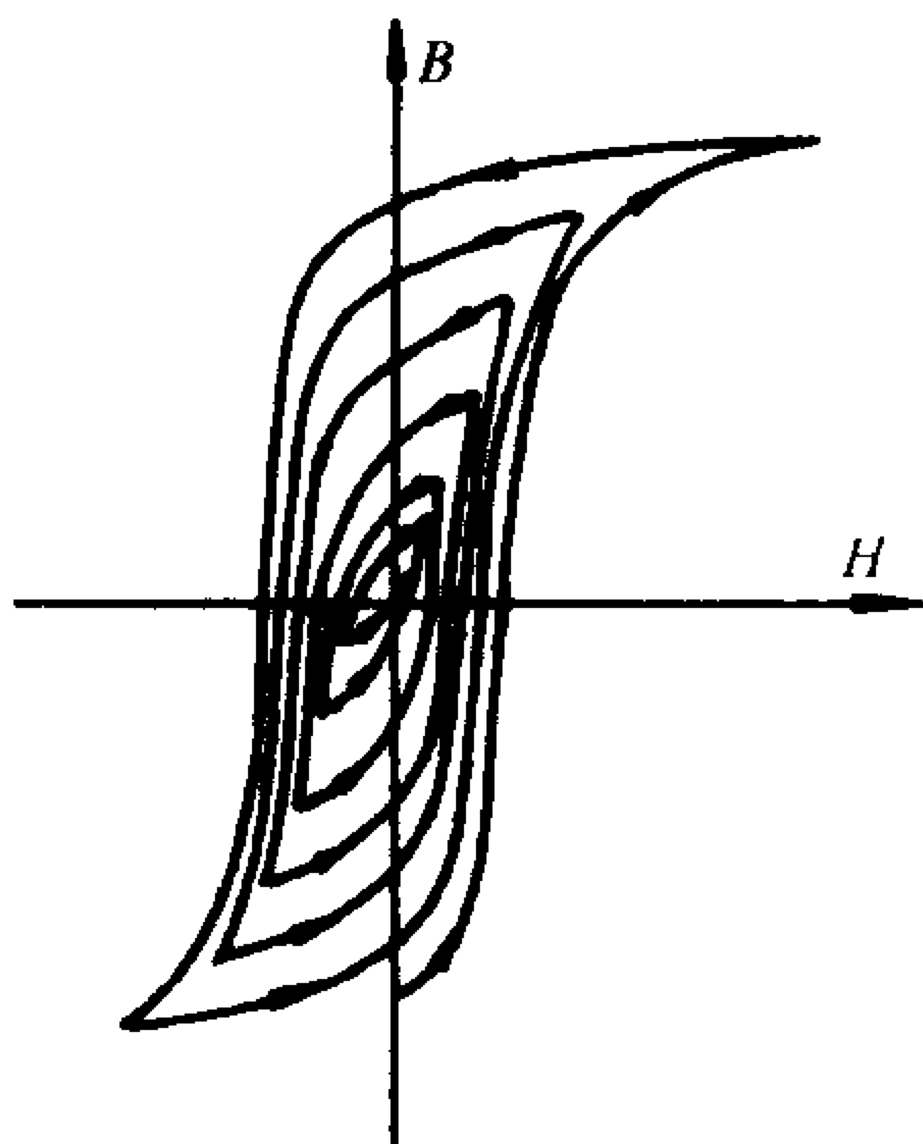


图 15-5 交流退磁过程

本实验采用交流退磁法,如图 15-6 所示. 图中 T 为调压变压器. 利用它把磁化电流升到样品的饱和磁化值,然后均匀地将电流逐渐减至零为止.

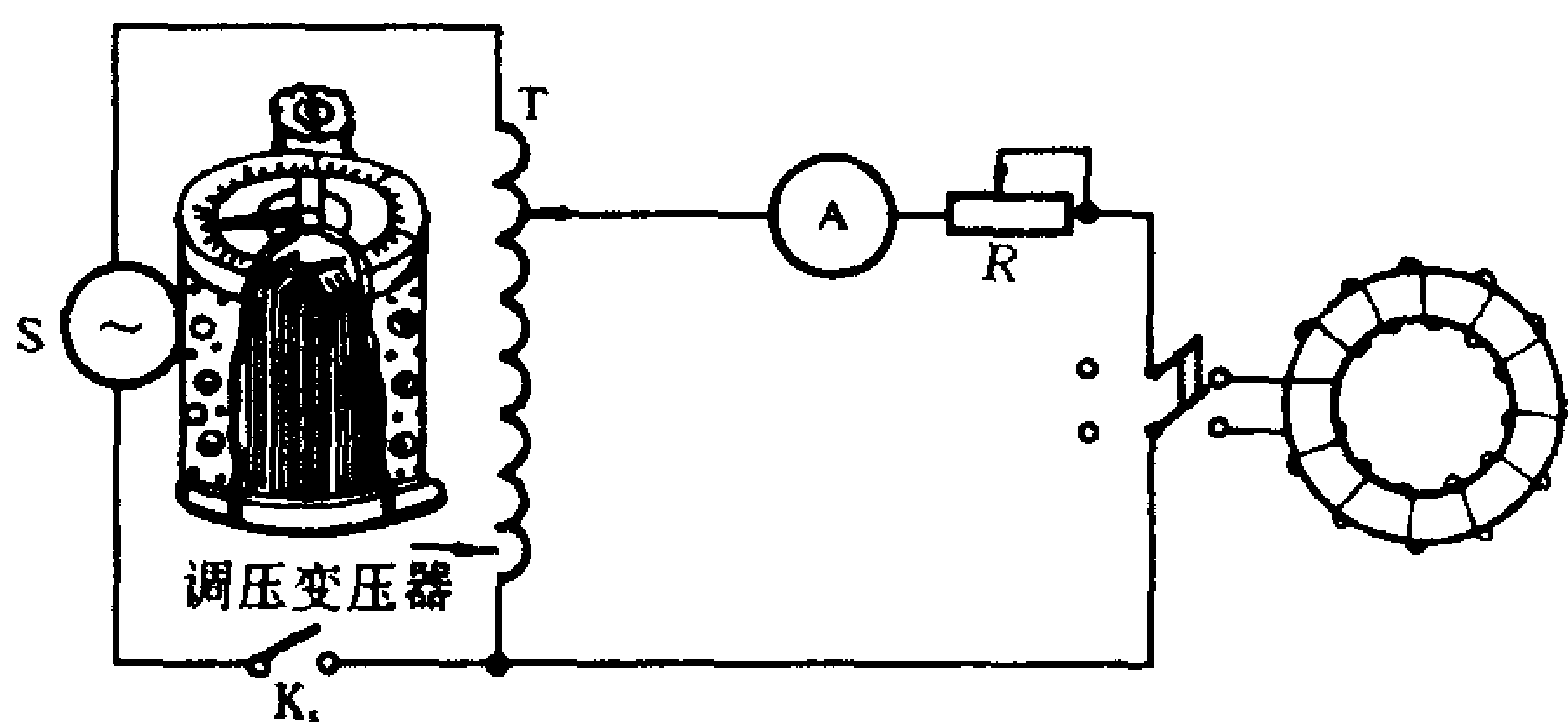


图 15-6 铁磁体的退磁线路图

实验内容

1．调节冲击电流计的工作状态

按图 15-4 接好，然后将 K_2 倒向左边和螺绕环相接，调节 R_1、R_2 使磁化电流达到某一最大值 I_{max}，一般到达磁饱和值．调节 R_3 使冲击电流计工作在过阻尼状态，同时满足在换向时冲击电流计有较大的偏转距离．为了减少冲击电流计回零的时间，可断开 K_3，冲击电流计便呈自由振荡状态，当偏转距离接近零时合上 K_3，电路便又处于过阻尼状态，振荡很快即停止，电流计也就较快地回至零位．

2．将样品按照图 15-6 进行退磁

初始退磁电流取样品的饱和电流，以后逐渐均匀减至零．电路中 R 作为限流电阻．注意：操作时电压不要调得过大，并注意安全操作．

3．测定冲击常量 k_ϕ 和磁通灵敏度 S_ϕ

置 R_1、R_2 于合适的数值，使电流表指示最小值，将 K_2 倒向右边和标准互感器 M 相接，调节 R_1、R_2 使通过标准互感器的电流小于它的额定值，然后将换向开关 K_1 换向，读出第一次最大偏转距离 $d_{m左}$，为了减少冲击电流计的系统误差，再将开关 K_1 换

向，在标尺的另一边读出 $d_{m右}$ 值，然后取平均值 $d=\frac{1}{2}(|d_{m左}|+|d_{m右}|)$，记下安培计读数 I_0、互感系数 M，代入(15－3)式求 S_ϕ 或 k_ϕ，取三个不同的 I_0 值，将所测得的 S_ϕ 或 k_ϕ 值取平均，写出

$$S_\phi \pm \Delta S_\phi \qquad \text{或者} \qquad k_\phi \pm \Delta k_\phi$$

注意：I_0 值不宜太小，否则 d_m 值读数太小，会加大 S_ϕ 或 k_ϕ 的误差，I_0 值也不宜过大，切勿超过标准互感器的额定电流.

4. 测量磁化曲线

将经过退磁的螺绕环接入图 15－4 电路中，K_2 倒向回路(Ⅱ). 闭合 K_4，断开 K_3，再闭合 K_1，由 R_1、R_2 调磁化电流(开始取较小值，如 0.05 A)，把 K_1 换向十余次，对被测材料进行磁锻炼，锻炼完毕后，断开 K_4，闭合 K_3，将换向开关 K_1 换向，记下冲击电流计第一次最大偏转距离 $d_{m左}$，再将换向开关 K_1 换向，记下标尺另一边的偏转距离 $d_{m右}$，取其平均值 $d=\frac{1}{2}(|d_{m左}|+|d_{m右}|)$. 将测到的结果代入(15－6)式即得对应的 B 值.

取不同的磁化电流，从 0.05 A 起至饱和电流值，电流每增加一次，重复上述测量(特别注意操作开关的顺序). 共测 10～15 个点，不同的磁化电流可得到不同的磁场强度，同时测出相应的磁感应强度 B. 将计算所得 B 值作纵坐标，H 为横坐标画曲线就得到该铁磁物质的基本磁化曲线，即所谓的 $B-H$ 曲线. 如果以 H 为横坐标，以 $\mu\left(=\frac{B}{H}\right)$为纵坐标，则可作 $\mu-H$ 曲线.

注意：在测量过程中电流只能单调增加，不允许电流在增加的过程中突然减小，否则测量点将不在基本磁化曲线上，这时必须重新退磁.

预习思考题

1. 什么叫做铁磁物质的“剩磁”和“矫顽力”?

2. 在测磁化曲线之前，为什么要将铁磁材料退磁？怎样进行交流退磁？

3. 何谓“磁锻炼”？

4. 测磁感应强度的实验线路中有几个回路？各种开关的作用是什么？如果 K_1 与 K_2 对调会产生怎样的后果？R_3 的作用是什么？测量时是否可以变动？为什么？

5. 在测冲击电流计常量时，I_0 的大小选择原则是什么？

复习思考题

1. 在测试基本磁化曲线时，为什么磁化电流必须单调上升？

2. 要使冲击电流计偏转为什么要使换向开关换向？

3. $\frac{\Delta k_\phi}{k_\phi}$ 的主要误差来源是什么？

4. 为什么测磁感应强度 B 时要将标准互感器次级线圈接入冲击电流计回路中，而测冲击电流计常数时要将磁化线圈的次级仍接入回路？能否分别接入回路进行测量？

5. 从 $B-H$ 磁化曲线与 $\mu-H$ 曲线可以了解哪些磁特性？

6. 试写出 $B-H$ 曲线的经验公式.

实验十六　磁场的描绘

目的

1. 研究载流圆线圈轴线上磁场的分布，加深对毕奥－萨伐尔定律的理解；

2. 掌握感应法测磁场的原理和方法；

3. 考查亥姆霍兹线圈的磁场的均匀区；

仪器和用具

音频信号发生器(具有功率输出)、晶体管万用表(MF－20型)、亥姆霍兹线圈实验装置、探测线圈等.

原理

1. 载流圆线圈轴线上的磁场分布

设圆线圈的半径为 R，匝数为 N，在通以电流 I 时，则线圈轴线上一点 P 的磁感应强度 B 等于

$$B=\frac{\mu_0 IR^2 N}{2(R^2+x^2)^{3/2}}=\frac{\mu_0 IN}{2R\left(1+\frac{x^2}{R^2}\right)^{3/2}} \tag{16-1}$$

式中 μ_0 为真空磁导率，x 为 P 点坐标，原点在线圈中心. 线圈轴线上磁场 B 与 x 的关系，如图 16－1 所示.

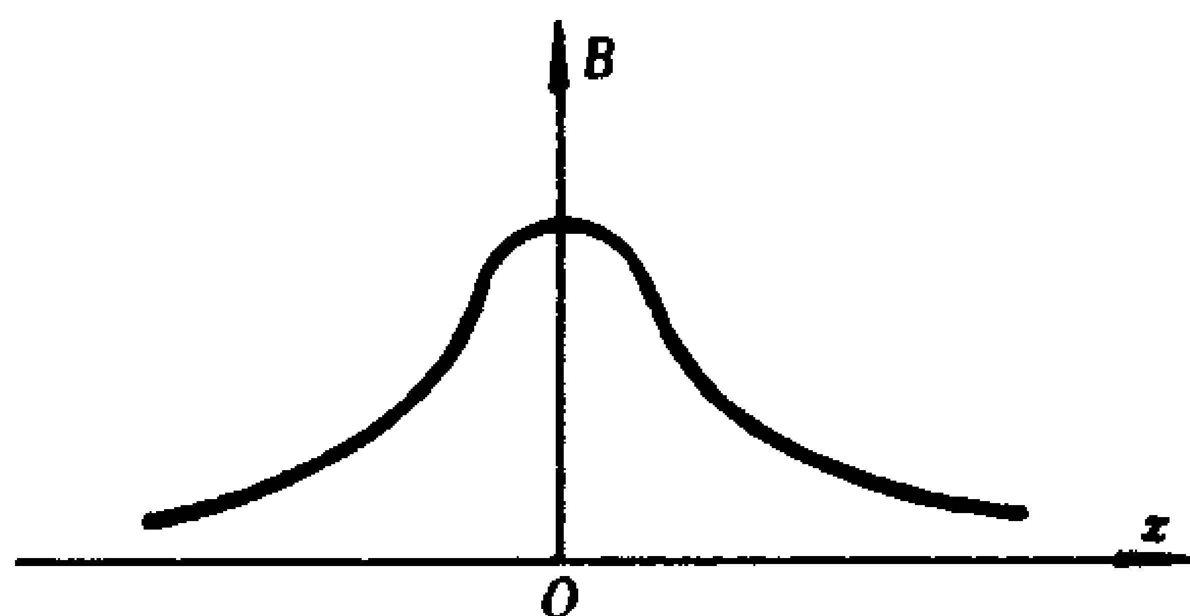


图 16－1　$B-x$ 曲线图

2. 亥姆霍兹线圈轴线上的磁场分布

亥姆霍兹线圈是由一对半径 R、匝数 N 均相同的圆线圈组成，二线圈彼此平行而且共轴，线圈间距离正好等于半径 R. 如图 16－2 所示，坐标原点取在二线圈中心联线的中点 O.

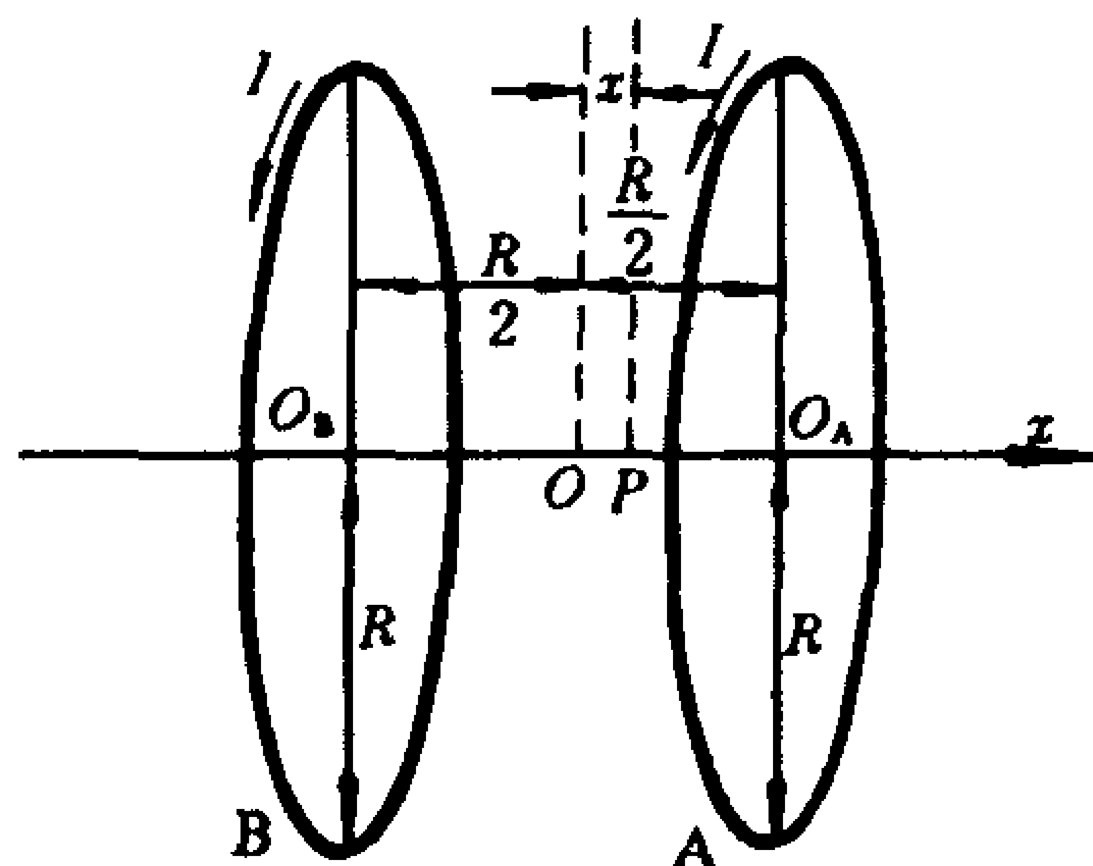


图 16－2

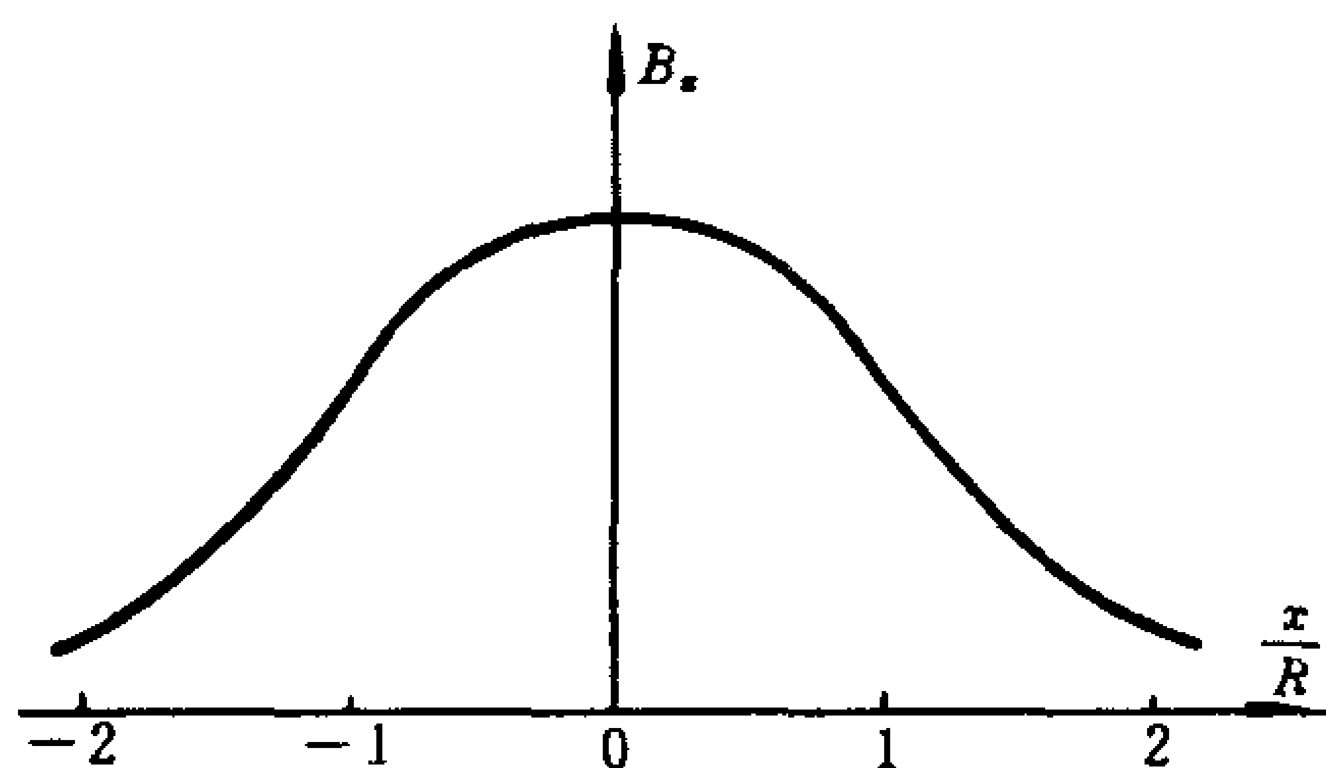


图 16－3

给二线圈通以同方向、同大小的电流 I，它们对轴上任一点 P 产生的磁场的方向将一致. A 线圈对 P 点的磁感应强度 B_A 等于

$$B_{A}=\frac{\mu_0 IR^2 N}{2\left[R^2+\left(\frac{R}{2}-x\right)^2\right]^{3/2}} \tag{16-2}$$

B 线圈对 P 点的磁感应强度 B_B 等于

$$B_{B}=\frac{\mu_0 IR^2 N}{2\left[R^2+\left(\frac{R}{2}+x\right)^2\right]^{3/2}} \tag{16-3}$$

在 P 点处 A、B 的合场强 B_x 等于

$$B_{x}=\frac{\mu_0 IR^2 N}{2\left[R^2+\left(\frac{R}{2}+x\right)^2\right]^{3/2}}+\frac{\mu_0 IR^2 N}{2\left[R^2+\left(\frac{R}{2}-x\right)^2\right]^{3/2}} \tag{16-4}$$

从式(16－4)可以看出，B 是 x 的函数，公共轴线中点 $x=0$ 处 B

值为

$$B(0)=\frac{\mu_0 NI}{R}\left(\frac{8}{5^{3/2}}\right)$$

很容易算出在 $x=0$ 处和 $x=\frac{R}{10}$ 处两点 B_x 值的相对差异约为 0.012%，在理论上可以证明，当二线圈的距离等于半径时，在原点 O 附近的磁场非常均匀，图 16-3 为 $B_x-\frac{x}{R}$ 曲线.

3. 磁场的测量

磁感应强度是一个矢量，对它的测量既要测大小，又要测方向. 测磁场的方法很多，在此实验中是用试探线圈去测交变磁场.

如图 16-4 所示，给一圆线圈(在此使用亥姆霍兹线圈的一支)通以某一频率的正弦交流电，设交流电的峰值为 I_m，则电流为 $I_m\sin\omega t$，如将峰值 I_m 改用电流表测得的有效值 I_e，由于 $I_m=\sqrt{2}I_e$，因而电流可写成为 $\sqrt{2}I_e\sin\omega t$，则圆线圈轴线上任一点 P 的磁感应强度

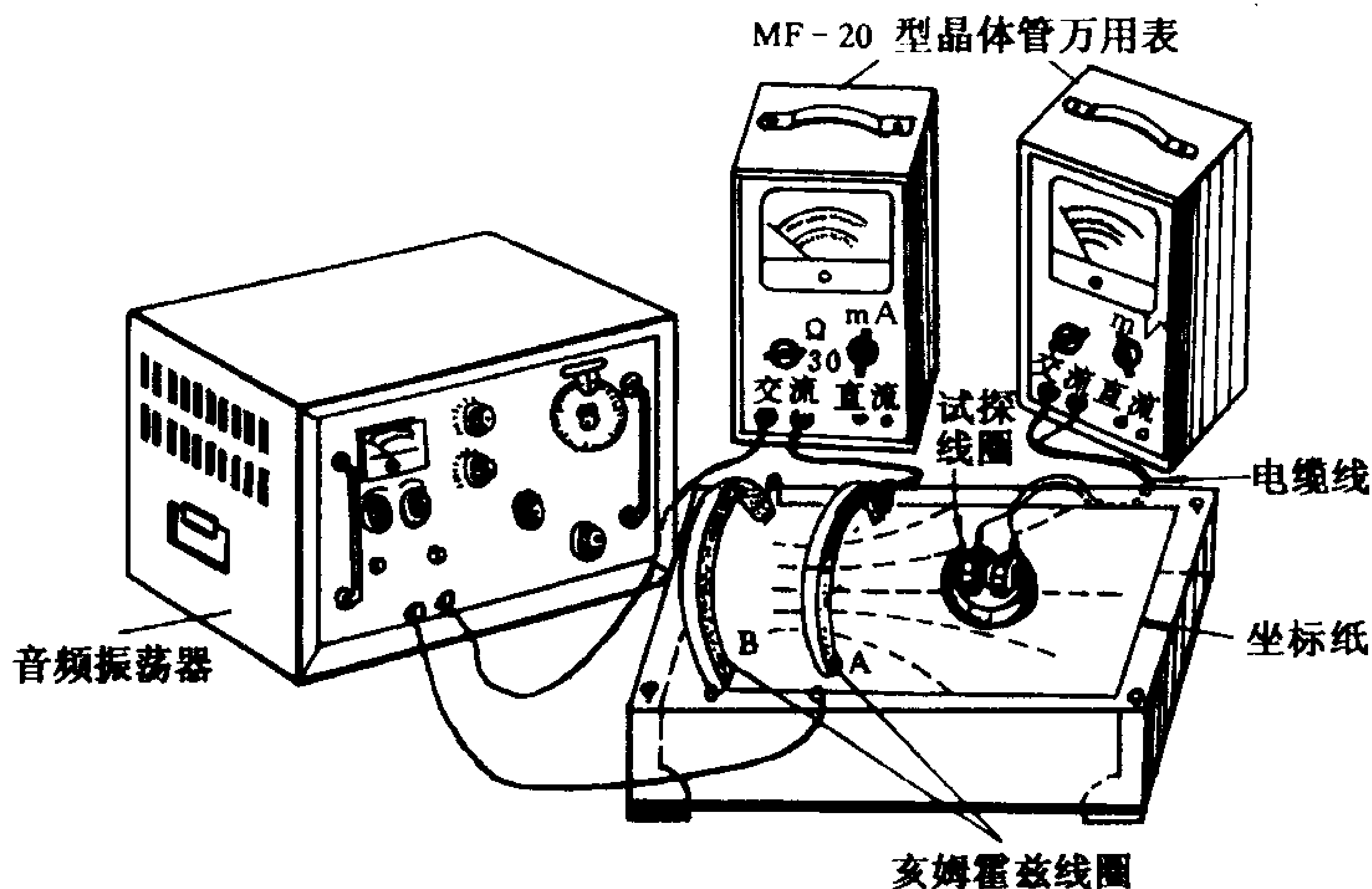


图 16-4 磁场描绘测试图

$$B=\frac{\mu_0 I_e N}{\sqrt{2}R\left(1+\frac{x^2}{R^2}\right)^{3/2}}\sin\omega t \tag{16-5}$$

设 B_m 为 B 的峰值，即

$$B_m=\frac{\mu_0 I_e N}{\sqrt{2}R\left(1+\frac{x^2}{R^2}\right)^{3/2}} \tag{16-6}$$

则

$$B=B_m\sin\omega t \tag{16-7}$$

如图 16－3 将一小的试探线圈置于圆线圈轴线上，设试探线圈法线与 $\boldsymbol{B}$ 的夹角为 θ，则通过试探线圈的磁通量为

$$\Phi=N_0 SB_m\cos\theta\cdot\sin\omega t \tag{16-8}$$

式中 S 为试探线圈的面积，N_0 为它的匝数. 感应电动势等于

$$E_{感}=-\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=-N_0 S\omega B_m\cos\theta\sin\omega t$$

而用交流毫伏表测量此 $E_{感}$ 时，显示值 U 为 $E_{感}$ 的有效值，即 $U=\frac{E_{感}}{\sqrt{2}}$，所以

$$U=\frac{N_0 S\omega}{\sqrt{2}}B_m\cos\theta$$

当试探线圈法线与圆线圈轴线方向一致时，$\theta=0$，则

$$U=\frac{N_0 S\omega}{\sqrt{2}}B_m \tag{16-9}$$

轴线上任一点测得的 U 值与圆线圈中心($x=0$)测得值 U_0 之比为

$$\frac{U}{U_0}=\frac{B_{mx}}{B_{m0}}=\frac{\dfrac{\mu_0 I_e N}{\sqrt{2}R\left(1+\frac{x^2}{R^2}\right)^{3/2}}}{\dfrac{\mu_0 I_e N}{\sqrt{2}R}}=\left(1+\frac{x^2}{R^2}\right)^{-3/2} \tag{16-10}$$

如果测得的 U 和 U_0 值之比符合上式，说明式(16－1)是正确的，

从而可间接加深对毕奥－萨伐尔定律的认识.

磁场的方向如何来确定呢？磁场的方向本来可用毫伏表读数最大值时所对应的试探线圈法线方向来表示，但是磁通量 Φ 的变化率小，因此测量方向的误差较大，当试探线圈转过 90°时，磁场方向与试探线圈法线方向相垂直，Φ 的变化率最大，故误差较小. 所以我们利用毫伏表读数的最小值来确定磁场的方向.

探测线圈　探测线圈如图 16－5 所示. 探测线圈的中心底座上有一个小铜钉，它用来确定磁场中待测点的位置. 探测线圈的底座设有刻度盘. 刻度盘上的零点与待测点的连线垂直于试探线圈的轴线. 当毫伏表的读数为最小值时该连线就表示了磁场的方向. 由刻度盘可读得磁场和 x 轴线方向的夹角，如图 16－5 所示. 一般的探测线圈测得的是平均磁场，为了测量各点磁场的真实值，探测线圈体积越小越好，但体积小线圈面积就小，感应电动势就很

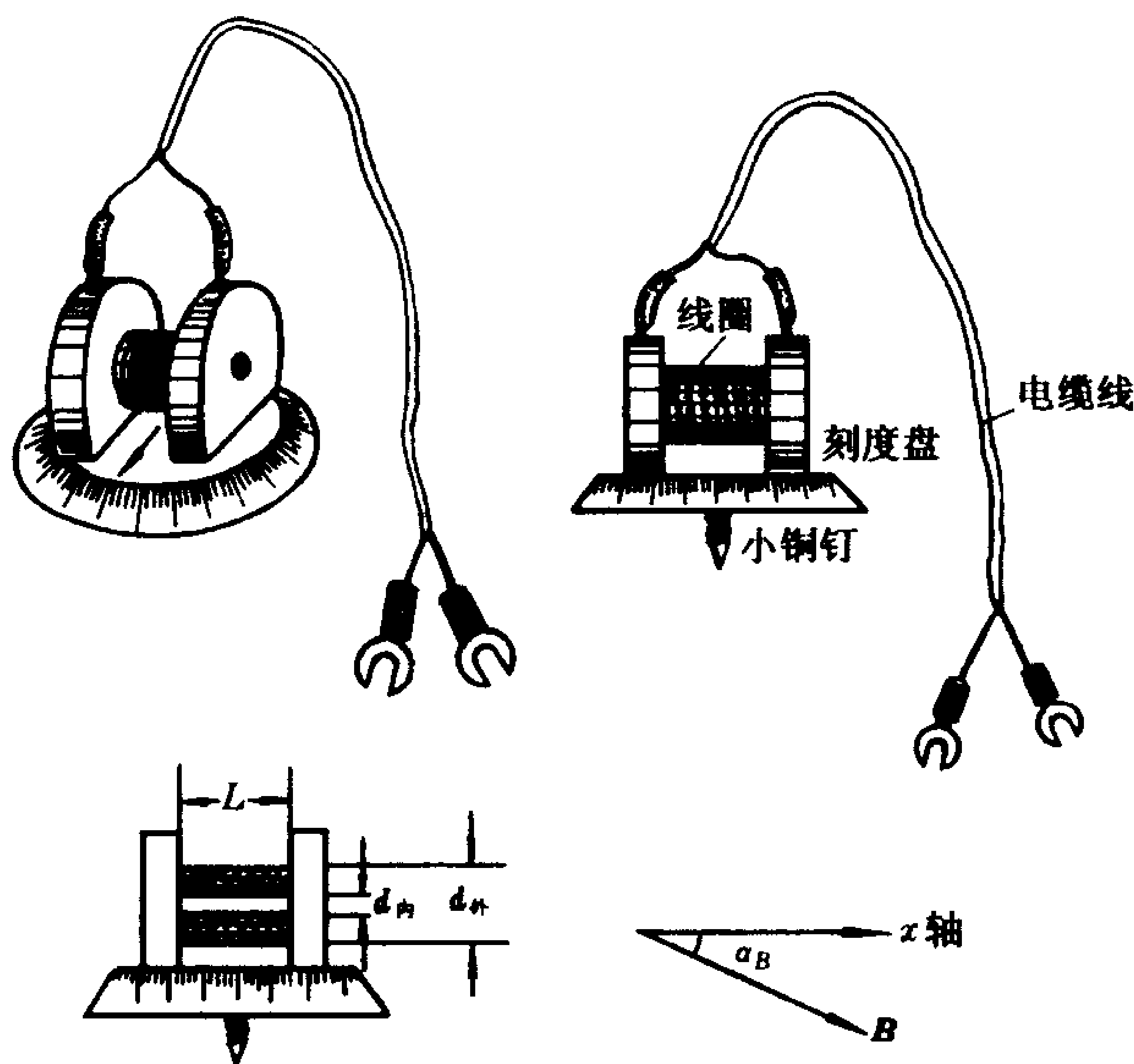


图 16－5　探测线圈结构图

微弱，不易测量．理论上可以证明，只要探测线圈按以下条件设计：

$$内径：d_{内}=\frac{1}{3}\ d_{外}$$

$$长度：L=\frac{2}{3}\ d_{外}$$

并且体积适当小，探测线圈测得的平均磁场就与探测线圈中心处一点的磁场相等效，它的等效面积为

$$S=\frac{13\pi}{108}d_{外}^{2}, \qquad (16-11)$$

$d_{外}$ 为探测线圈的外径．代入(16－9)式就可以算出探测线圈几何中心处磁感应强度的绝对值．

$$B_{m}=\frac{\sqrt{2}\times 108U}{13\pi N_{0}d_{外}^{2}\ \omega} \qquad (16-12)$$

式中 $\omega=2\pi f$，f 为交变磁场的频率，N_0 为探测线圈的匝数．

4．利用亥姆霍兹线圈验证磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的矢量叠加原理

根据矢量叠加原理，空间某一点的合磁场应为各分磁场的矢量和．如图 16－6．

设空间的任一点 P，由 A 线圈单独产生的磁场为 $\boldsymbol{B}_{mA}$，其与 x 轴夹角为 α_A，由 B 线圈单独产生的磁场为 $\boldsymbol{B}_{mB}$，其与 x 轴夹角为 α_B，则二线圈同时作用下的磁场为 $\boldsymbol{B}_{m(A+B)}$，其与 x 轴夹角为 α_{A+B}，根据矢量叠加原理，

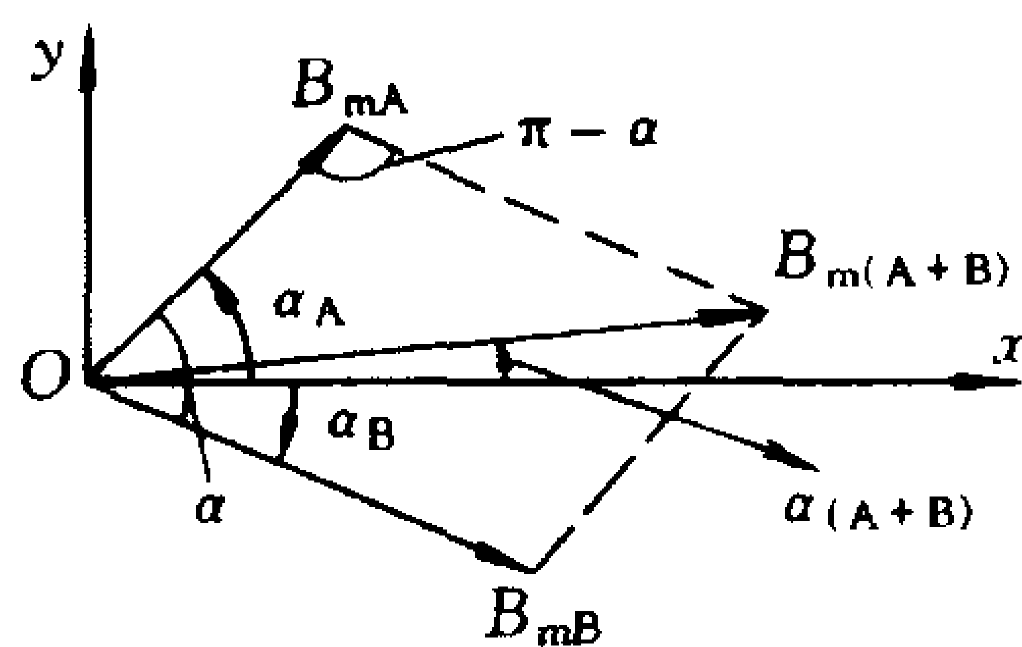


图 16－6　磁感应矢量叠加原理图

$$\boldsymbol{B}_{m(A+B)}=\boldsymbol{B}_{mA}+\boldsymbol{B}_{mB}$$

当然在这三种情况，线圈中的电流应保持不变．则合矢量的大小等于

$$B_{m(A+B)}^{2}=B_{mA}^{2}+B_{mB}^{2}+2B_{mA}\cdot B_{mB}\cos\left(\alpha_{A}+\alpha_{B}\right)$$

根据式(16－9)可知,探测线圈测得的电动势 U 与 B_m 成正比,即上式中的各 B_m 值可用测量值 U 代替,即

$$U_{A+B}^2 = U_A^2 + U_B^2 + 2U_A \cdot U_B \cos(\alpha_A + \alpha_B) \quad (16-13)$$

$$\alpha_{A+B} = \mathrm{tg}^{-1} \frac{U_A \cdot \sin \alpha_A + U_B \cdot \sin \alpha_B}{U_A \cdot \cos \alpha_A + U_B \cdot \cos \alpha_B} \quad (16-14)$$

如果测得的 U_A、U_B、α_A、α_B和 U_{A+B}、α_{A+B}之间满足上二式的关系,则可认为磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 为矢量.

实验内容

1. 测量载流圆线圈的磁场沿轴线的分布

将坐标纸平铺在亥姆霍兹线圈装置平台上. 在坐标纸上标定出 O_A、O_B 及 O 点的位置,再标出轴线的方向.

按图 16－4 接线,将音频信号发生器(使用功率输出端)、线圈 A 和晶体管万用表(使用毫安挡)组成一串联电路. 信号频率取 1.00 kHz,电流 I (mA)适当取值(例如,取 10.0 mA).

将探测线圈接到晶体管万用表的交流毫伏挡.

从 O_A 开始,沿轴线方向每隔 1.00 cm 用探测线圈测一下 U(转动探测线圈,mV 表指示值最大时)及磁场方向(转动探测线圈,在 mV 表指示值最小时,记下探测线圈与轴线方向的夹角值). 在轴线方向取 12～15 个测量点.

要注意圆线圈中电流保持恒定:使用晶体管万用表测交流 I(mA)及电压 U(mV)时,要先用较大量限,使用后要离开交流挡.

作$\dfrac{U}{U_0}\left(=\dfrac{B_{mx}}{B_{m0}}\right)-\dfrac{x}{R}$曲线和$\left(1+\dfrac{x^2}{R^2}\right)^{-3/2}-\dfrac{x}{R}$曲线并进行比较.

2. 圆电流周围磁力线的描绘

将探测线圈的小铜钉放在待测点的位置,用手按探测线圈,小铜钉就在坐标纸上记下一个小圆点,表示待测点的位置,转动探测线圈使毫伏表达到最小值,用细铅笔在坐标纸上记下刻度盘零刻

度的位置,拿走探测线圈,用铅笔连结这两个小圆点,小箭头的方向就表示待测点磁场的方向,第二、第三……、诸点磁场的方向按上述方法进行测量.

实验要求在1/4的象限内测画三条磁力线,线间分布尽量均匀并能覆盖1/4图纸平面.

3. 验证磁场的叠加原理

选择亥姆霍兹线圈的中心点为坐标原点,在x轴上、y轴上和x、y平面上,分别任取一至二个考察点,先分别测出A、B线圈磁场的大小、方向,再测出A、B线圈顺向串联后的磁场大小、方向. 注意:**线圈电流要保持相同的数值**. 逐点验证叠加原理. 按矢量叠加原理算得的磁场大小和方向,与将A、B线圈串联起来所测得的磁场大小和方向进行比较.

测试表格:

x/cm	y/cm	U_A/mV	α_A/(°)	U_B/mV	α_B/(°)	U_{A+B}/mV	α_{A+B}/(°)
2.0	0						
0	-8.0						
-2.0	-6.0						

4. 亥姆霍兹线圈中$\frac{\Delta B}{B_0}=1\%$匀强区的描绘

调节音频振荡器的输出电压,使亥姆霍兹线圈中心处最大的感应电压为10.0 mV,描绘亥姆霍兹线圈中心附近、最大感应电压在(10.0±0.1) mV范围内的区域,即偏差不超过1%的均匀区.

预习思考题

1. 感应法测磁场的基本原理是什么?
2. 为什么测定圆线圈轴上$\frac{U}{U_0}-x$曲线,便能确定$\frac{B}{B_0}-x$的分布规律?
3. 怎样利用试探线圈测量磁场的大小和方向?
4. 如何测定磁场的方向?为什么不根据转动试探线圈使毫伏表达最大

值来确定磁场方向?

5. 如何描绘磁力线?

6. 怎样用感应法测量磁场的绝对值?

复习思考题

1. 圆电流的磁场分布规律是什么? 如何验证毕奥－萨伐尔定律的正确性?

2. 如何证明磁场是符合叠加原理的?

3. 离圆形电流中心等距离处的磁场是否相等? 请用实验证明,并试用毕奥－萨伐尔定律解释.

4. 试分析感应法测磁场的优缺点和适应的条件?

5. 若亥姆霍兹线圈中通以直流电,其磁场又如何测定? 试画出测量线路图,简要说明其实验步骤.

6. 亥姆霍兹线圈能产生强磁场吗? 为什么?

实验十七　磁致伸缩系数的测定

目的

1. 研究磁致伸缩系数与磁场强度的关系；
2. 掌握非平衡电桥的原理；
3. 学习一种非电量的电测方法.

仪器和用具

电阻箱、光点检流计、直流电源、直流电流表、滑线电阻、螺线管、电阻应变片、待测样品(如镍、铁铝合金等)、交流电流表、调压变压器等.

原理

1. 磁致伸缩和磁致伸缩系数

磁性材料被磁化时,其各个方向的长度将会发生微小的变化(伸长或缩短),这种现象称为磁致伸缩. 不同的磁性物质磁致伸缩的长度形变是不同的, 通常用磁致伸缩系数 λ $\left(=\frac{\Delta l}{l}\text{也即它的相对伸长}\right)$表征形变的大小,$\lambda>0$ 表示伸长,$\lambda<0$ 即表示缩短,$\lambda=0$ 表示不变. 磁致伸缩系数的大小大致在 $10^{-6}\sim10^{-3}$范围内,对于多数铁磁质来说,它们的磁致伸缩系数一般为 $10^{-6}\sim10^{-5}$的数量级,近几年来发现了某些材料在低温下的 λ 值可以达到 10^{-1}数量级. 磁致伸缩系数与磁体的磁化过程有关,当磁体磁化至饱和时,λ 亦趋近一饱和值 λ_m. 本实验是在室温下测量磁致伸缩系数与外磁场的关系. 为了表征它们的数量关系,常用公式

$$\lambda = f(H) \tag{17-1}$$

来描述. 式中 λ 为磁致伸缩系数,H 为外加磁场的磁场强度,单位为 $A \cdot m^{-1}$. 外磁场由通过螺线管的电流产生,它的大小为

$$H = k_0 I \tag{17-2}$$

式中 k_0 为比例常量,与螺线管的结构、几何尺寸等因素有关,单位为 m^{-1}.

2. 电阻应变片与磁致伸缩系数的测量

本实验采用应变电阻作转换机构的非平衡电桥法来测量磁致伸缩系数 λ. 实质上这是一种利用应变电阻将磁致伸缩的形变转换为电阻的变化,从而测定磁致伸缩系数,它是一种非电量的电测方法,这种测量 λ 的方法是最简便易行的.

应变电阻是将一根对形变十分敏感,温度系数又很小的康铜丝盘折起来,粘在两层绝缘性能很好的薄纸片之间,并在其两端焊上较粗的导线作为引出线而制成,如图 17－1 所示. 称为应变电阻片或简称应变片

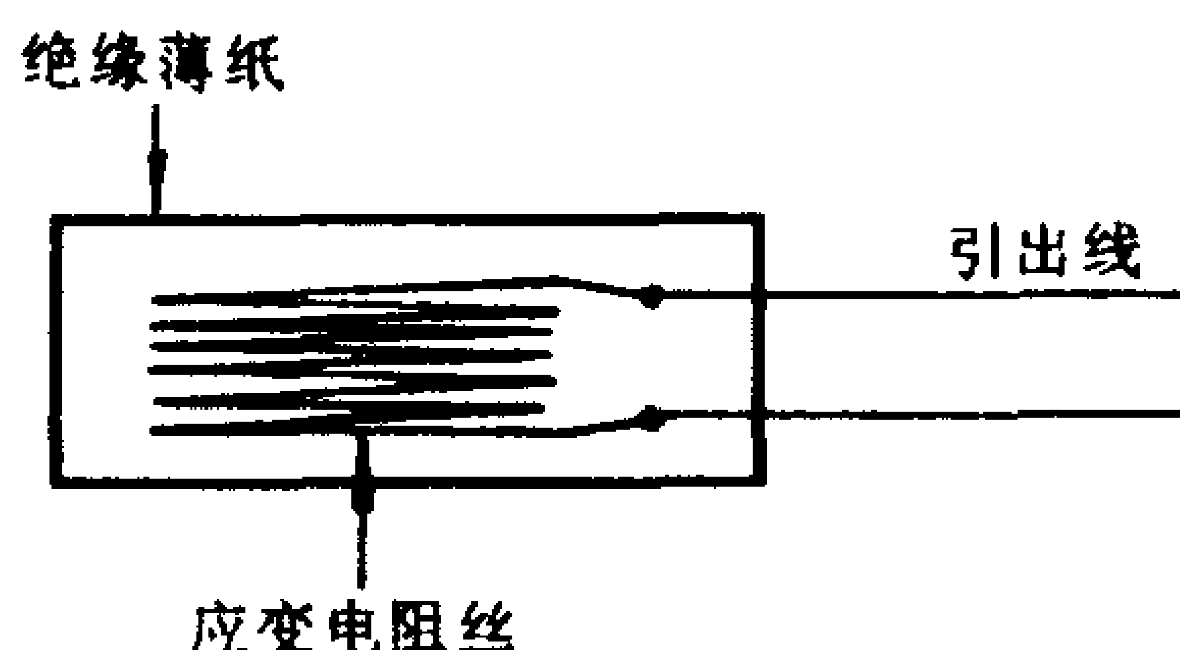


图 17－1　应变电阻片

应变片的阻值 $R = \rho \dfrac{l}{S}$,当形变时,则

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}$$

或

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2\frac{\Delta r}{r} \tag{17-3}$$

其中 ΔR 是形变所产生的电阻变化值. Δl 是电阻丝长度的变化.

l 是电阻丝的长度，r 是应变电阻丝的半径，S 为横截面积，若横截面是圆形，则$\frac{\Delta S}{S}=2\frac{\Delta r}{r}$. 电阻丝半径的相对变化量与长度的相对变化量具有如下关系：

$$\frac{\Delta r}{r}=-\mu\frac{\Delta l}{l}$$ ①

代入式(17－3)得

$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta\rho}{\rho}+(1+2\mu)-\frac{\Delta l}{l}$$

对于不同金属，常数 μ 的数值也不同. 若形变时的电阻率 ρ 不发生变化，上式为

$$\frac{\Delta R}{R}=S_l\frac{\Delta l}{l}=S_l\lambda \qquad (17-4)$$

式中 $S_l=(1+2\mu)$ 称为电阻应变片的灵敏系数，该值由生产应变电阻片的工厂给定，一般在 2.00 左右. 上式说明了电阻应变片电阻的相对变化$\frac{\Delta R}{R}$与长度的相对变化$\frac{\Delta l}{l}$成正比.

测量时用特殊的"粘合剂"将应变电阻片紧密贴在样品上，这样，样品在磁化时所产生的形变，便通过纸片完全传到应变电阻丝上，从而引起其电阻的变化. 对于灵敏系数 S_l 已知的应变电阻，只要测出电阻的变化率，由(17－4)式就可以求出磁致伸缩系数 λ 值. 于是，测量铁磁体磁致伸缩系数 λ，就归结为测量应变电阻的相对变化量$\frac{\Delta R}{R}$.

---

① 根据 $V=\pi r^2 l, r=\sqrt{\frac{V}{l\pi}}$，即

$$\frac{\Delta r}{r}=\frac{1}{2}\frac{\Delta V}{V}-\frac{1}{2}\frac{\Delta l}{l}=\frac{1}{2}\left(\alpha\frac{\Delta l}{l}\right)-\frac{1}{2}\frac{\Delta l}{l}$$
$$=\frac{1}{2}(\alpha-1)\frac{\Delta l}{l}=-\mu\frac{\Delta l}{l}$$

式中 $\mu=\frac{1}{2}(1-\alpha)$ 称为泊松数.

3. 非平衡电桥与 λ 的测量

测量电阻的最精确方法是电桥法，如果用平衡电桥测电阻，每次都要调节平衡(使检流计指“0”)，但由于磁致伸缩系数很小，所对应的电阻变化量比调平衡旋钮的接触电阻小得多，因此在调平衡时会发现阻值涨落很大，出现不稳定现象．采用非平衡电桥法就可以消除接触电阻的影响．

等臂惠斯通电桥具有最高的灵敏度，但是电阻的相对变化 $\frac{\Delta R}{R}$ 约为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$，对于 $R = 120.0\ \Omega$ 的电阻，其 ΔR 则要达到约 $10^{-4}\ \Omega$ 变化，要分辨这么小的电阻相对变化不是一件容易事，电阻应变片的温度系数和样品的热膨胀的大小都要影响磁致伸缩系数的测量，如何限制和减少这些系统误差成为本实验重点考虑的方面．

测量线路如图 17－2 所示，R_1 为贴在铁磁体上的电阻应变片，阻值为 $(120.0 \pm 0.5)\ \Omega$，R_2 为 R'_1 和 R'_2 的并联等效电阻，R'_1 也是电阻应变片，贴在非铁磁体的紫铜板上，阻值为 $(120.0 \pm 0.5)\ \Omega$，R'_2 是 0.1 级的电阻箱作为调节电桥平衡用的精细调节电阻．R_4 为 R'_4 和 R''_4 的串联等效电阻，R_3、R'_4 均为等值的应变电阻，R''_4 为 0.1 级电阻箱(接 0～0.9 的接线端钮)，作为调节电桥平衡用的粗调电阻．G 是 AC15/4 型直流复射式检流计，其分度值 $< 5 \times 10^{-9}\ \text{A} \cdot \text{div}^{-1}$．$E$ 是直流电源、R_g 是 0.1 级的电阻箱，R 是滑线变阻器作调节电桥灵敏度用．

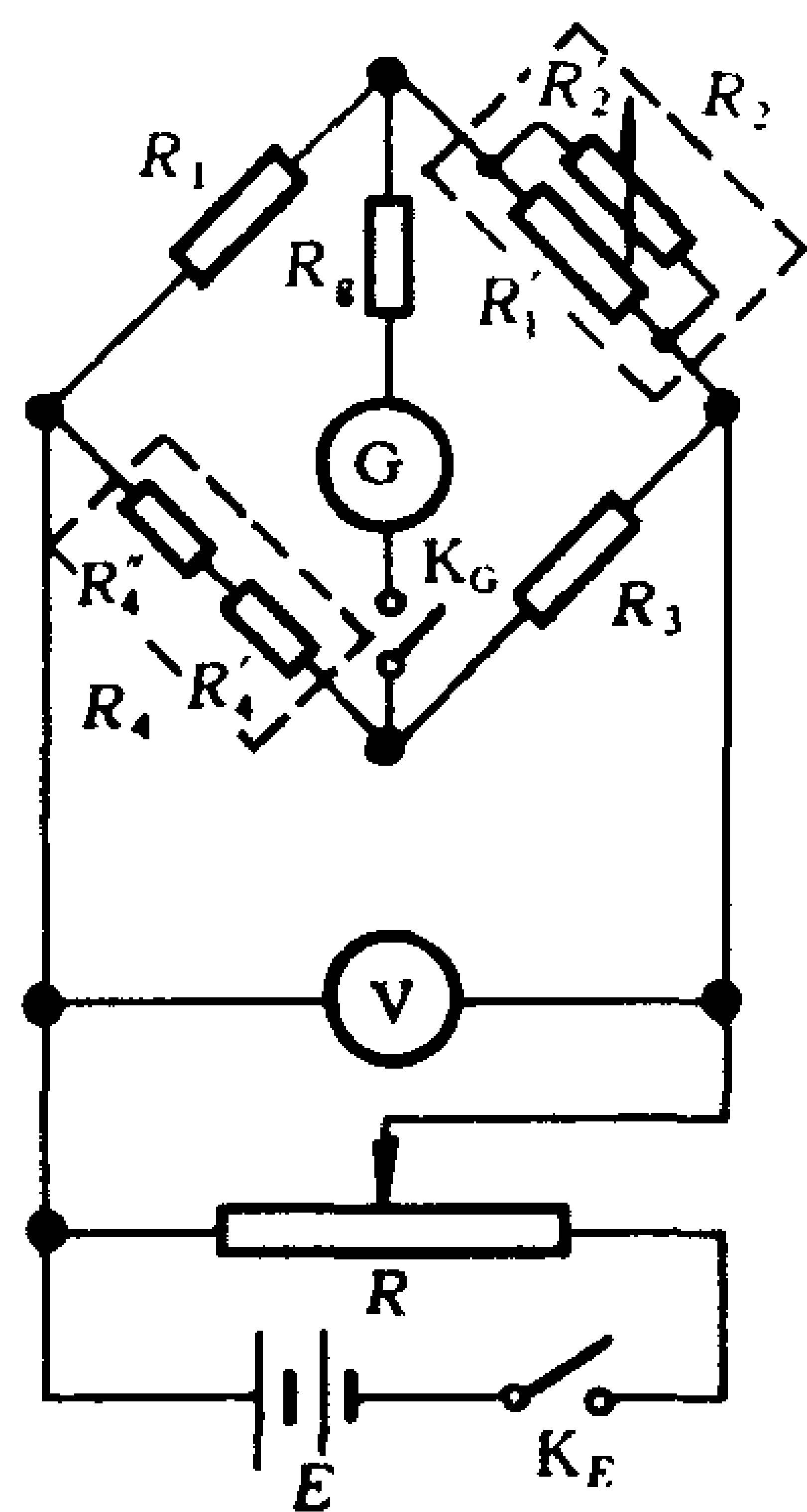


图 17－2　非平衡电桥

(1) 对测量电路的说明

① 因为电阻是温度和磁场强度的函数，为了消除温度及磁阻效应的影响，四个桥臂都用阻值相同的应变电阻，组成等臂电桥，其中 R'_1 粘在热膨胀系数与样品相近的非磁性材料上，如铜块等. 应变电阻丝都沿着磁场的方向，R_1 与 R'_1 两者紧靠在一起置于磁场中，这样既能保证两者温度始终一致，又能消除磁阻效应的影响. 此外将 R_3、R'_4 粘在同一块铜块上(注意应变片彼此绝缘)并置于磁场之外.

采用上述措施目的是限制和消除温度和磁阻效应的影响，因为当室温变化或磁化装置发热，电流的热效应及磁场作用于电阻丝时，其电阻都要发生变化，当相邻桥臂的电阻变化相等时，电桥的起始平衡条件并不受破坏，因而不影响非平衡偏转. 另外，温度变化还会引起热膨胀，这对粘在同一铜块上的 R_3、R'_4 来说，热膨胀所引起的电阻改变在这两相邻桥臂的反映都是相等的，故对非平衡偏转没有影响；但对于 R_1、R_2 两相邻臂来说，因为两片应变电阻片粘在不同的材料上，其热膨胀系数相近，但不相同，因此在温度变化过程中，即使保持两者的温度始终一致，热膨胀的差异也不能完全消除，所以测量时要尽可能缩短测量时间.

② 为了调节电桥平衡和测量电桥灵敏度，在 R'_4 臂上串联一个小量程的可变电阻 R''_4($R''_4 \ll R'_4$)(为了减少接触电阻与零电阻的影响，接至 ZX－21 型电阻箱 0 与 0.9 两个端钮)，作为电桥平衡的粗调电阻.

电桥在粗调平衡时，分压值先取得小些；随之适当增加，使得以后作非平衡电桥的测量时，对应于最大的“λ”值，光斑可在偏格较大的位置，但不偏出格，以保证足够的测量精度，电压一般取 1.50～3.00 V. 在测量电桥灵敏度之前、先将样品退磁，然后调节电桥平衡. 加磁场后，测量时就不需要再进行平衡调节了，只要根据电桥非平衡时检流计偏转的角度(α)，就可以计算出相应阻值的大小.

(2) 电阻值变化与检流计偏转角度的关系及其计算方法

为了计算方便,将 17－2 图简化成 17－3 图. 当电桥平衡时,

$$R_1 = \frac{R_2}{R_3}R_4$$

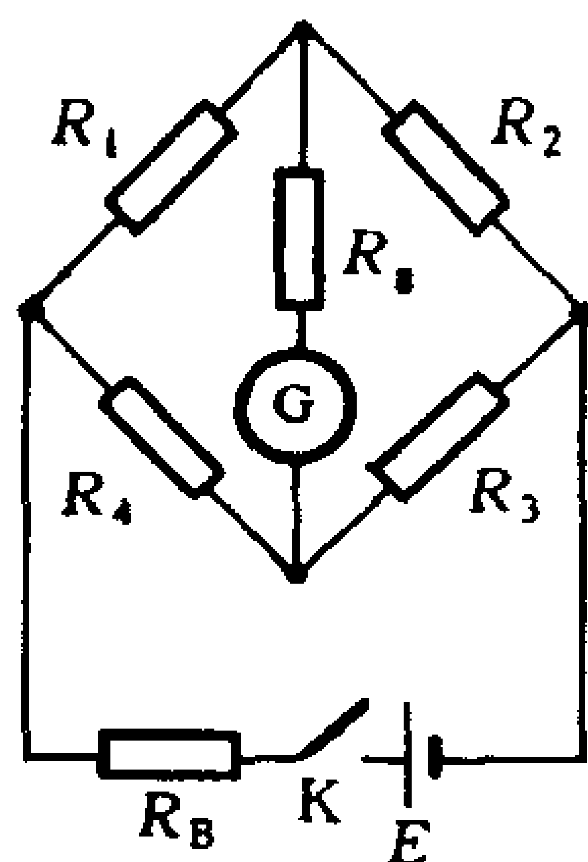


图 17－3 非平衡电桥原理图

如果 $R_1 \to R_1 + \Delta R_1$,则电流计有电流 I_g 流过,电桥失去平衡,可以证明,通过检流计的电流 I_g 与桥臂电阻的变化 (ΔR_1)成正比[①],即

$$I_g = k_1 \Delta R_1 \qquad (17-5)$$

因为电流计偏转角度(α)与通过的电流 I_g 成正比,

即

$$\alpha = k_2 I_g \qquad (17-6)$$

式中 k_2 为电流计常量,单位为分度每安培.

则

$$\alpha = k_1 k_2 \Delta R_1 \qquad (17-7)$$

为了研究电阻值的相对变化,取

$$\alpha = k_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right) \qquad (17-8)$$

k_3 可通过实验比较精确地加以确定.

(3) k_3 的测量

① 按图 17－2 连接线路,R_2' 阻值可预置为 10 kΩ 左右.

② 接通电源,调节电桥平衡,改变 R_4'' 值,可使电桥粗略平衡,再改变 R_2' 值,可使电桥进一步平衡,待电桥平衡后记下 R_2' 值,用 R_{20}' 表示. 电桥平衡的标准是:AC15/4 型光斑检流计的分度器放在"×1"档,伏特计指示值不低于 1.50 V,光斑刻度偏离"0"不

① 参阅附记.

多于$\frac{1}{4}$小格；

③ 再改变 R'_2，使电桥失去平衡，光斑发生偏转. 记下下表所列几种偏转时的$\frac{\Delta R'_2}{R'_2}$. 表中 R'_{20}为电桥平衡时的 R'_2 值，$\frac{\Delta R'_2}{R'_{20}}=\frac{R'_2-R'_{20}}{R'_{20}}$即 R'_2 的相对变化量.

α/div	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
$\frac{\Delta R'_2}{R'_{20}}$						

因为

$$R_2=\frac{R'_1R'_2}{R'_1+R'_2}$$

故

$$\begin{aligned}\frac{\Delta R_2}{R_2}&=\frac{\Delta R'_1}{R'_1}+\frac{\Delta R'_2}{R'_2}-\frac{\Delta(R'_1+R'_2)}{R'_1+R'_2}\\&=\left(\frac{1}{R'_1}-\frac{1}{R'_1+R'_2}\right)\Delta R'_1\\&\quad+\left(\frac{1}{R'_2}-\frac{1}{R'_1+R'_2}\right)\Delta R'_2\end{aligned}$$

又因 $\Delta R'_1=0$，$R'_1\ll R'_2$，所以

$$\frac{\Delta R_2}{R_2}=\frac{R'_1\Delta R'_2}{R'_2(R'_1+R'_2)}=\frac{R'_1}{R'_2}\frac{\Delta R'_2}{R'_2}$$

在平衡点附近有

$$\frac{\Delta R_2}{R_2}=\frac{R'_1}{R'_2}\frac{\Delta R'_2}{R'_2}\bigg|_{R'_2=R'_{20}}=\frac{R'_1}{R'_{20}}\frac{\Delta R'_2}{R'_{20}}\qquad(17-9)$$

即总阻值 R_2 的相对变化与并联电阻 R'_2 的相对变化成正比. 电桥平衡时有

$$R_1 = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4$$

如在测量过程中只改变可变电阻 R'_2 的值.（即 $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0.$）则

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{R'_1}{R'_{20}} \cdot \frac{\Delta R'_2}{R'_{20}} \tag{17-10}$$

根据式(17－10)、$\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)$与表中测量的数据($\alpha$)，及式(17－8)可知

$$k_3 = \frac{\alpha}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = \frac{\alpha}{\frac{R'_1}{R'_{20}} \cdot \frac{\Delta R'_2}{R'_{20}}}$$

根据 6 个 α 值与其对应的$\frac{\Delta R_1}{R_1}$值可求得 6 个 k_3 值，取其平均值，则$\overline{k}_3$ 就是非平衡电桥的灵敏度. 再将$\frac{\alpha}{\overline{k}_3}$代替式(17－4)中的$\frac{\Delta R_1}{R_1}$，得出 λ 的计算公式为

$$\lambda = \frac{1}{\overline{k}_3 S_l}\alpha$$

这说明非平衡电桥测得的相对伸长与电桥平衡时检流计的偏角大小成正比.

建立不同的外磁场 H，由检流计读出不同的 α，可计算出各种外磁场强度下的磁致伸缩系数 λ，然后以 H 作为横坐标，λ 作为纵坐标，画出一条磁致伸缩系数随外磁场强度变化的曲线. 根据曲线求得 $\lambda = f(H)$的经验公式.

4. 几点注意

(1) 实验时必须将 R_1 和 R'_1 两块电阻应变片同时放到螺线

管的匀强磁场中，为了减少和限制由温度与磁场引入的系统误差，测量时尽可能缩短测量时间.

(2) 为了防止铁磁物质的剩磁对测量的影响，测量前务必进行退磁.

(3) 由于测量的是微小长度变化，故直流电源必须用波纹因数小，性能稳定的.

本实验采用交流退磁方法，利用调压变压器在螺线管中通以交流电，电路如图 17-4 所示.

交流电流的有效值从不小于最大的磁化电流开始，逐渐减少到零，就可认为退磁完毕. 退磁时必须注意安全. 测量线路如图 17-5 所示.

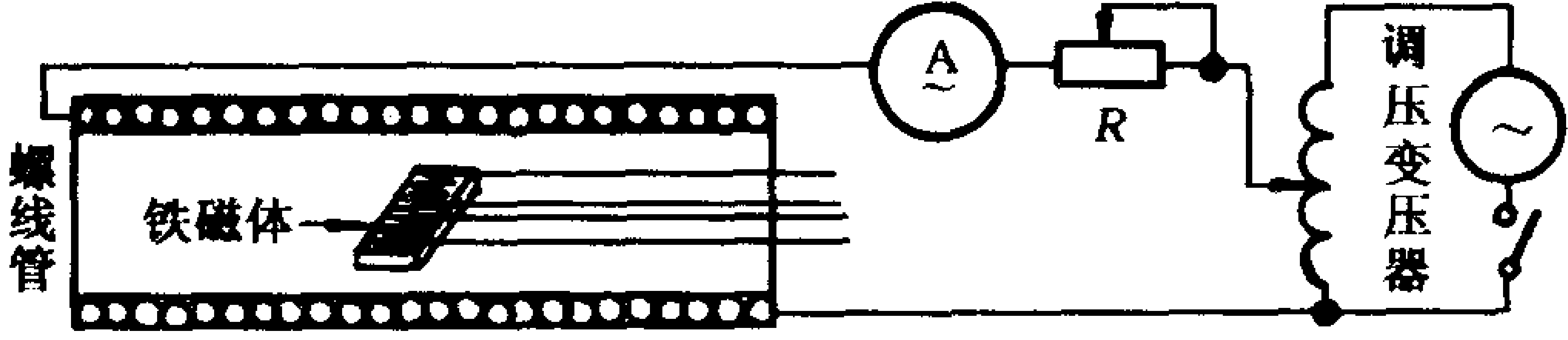


图 17-4 退磁电路图

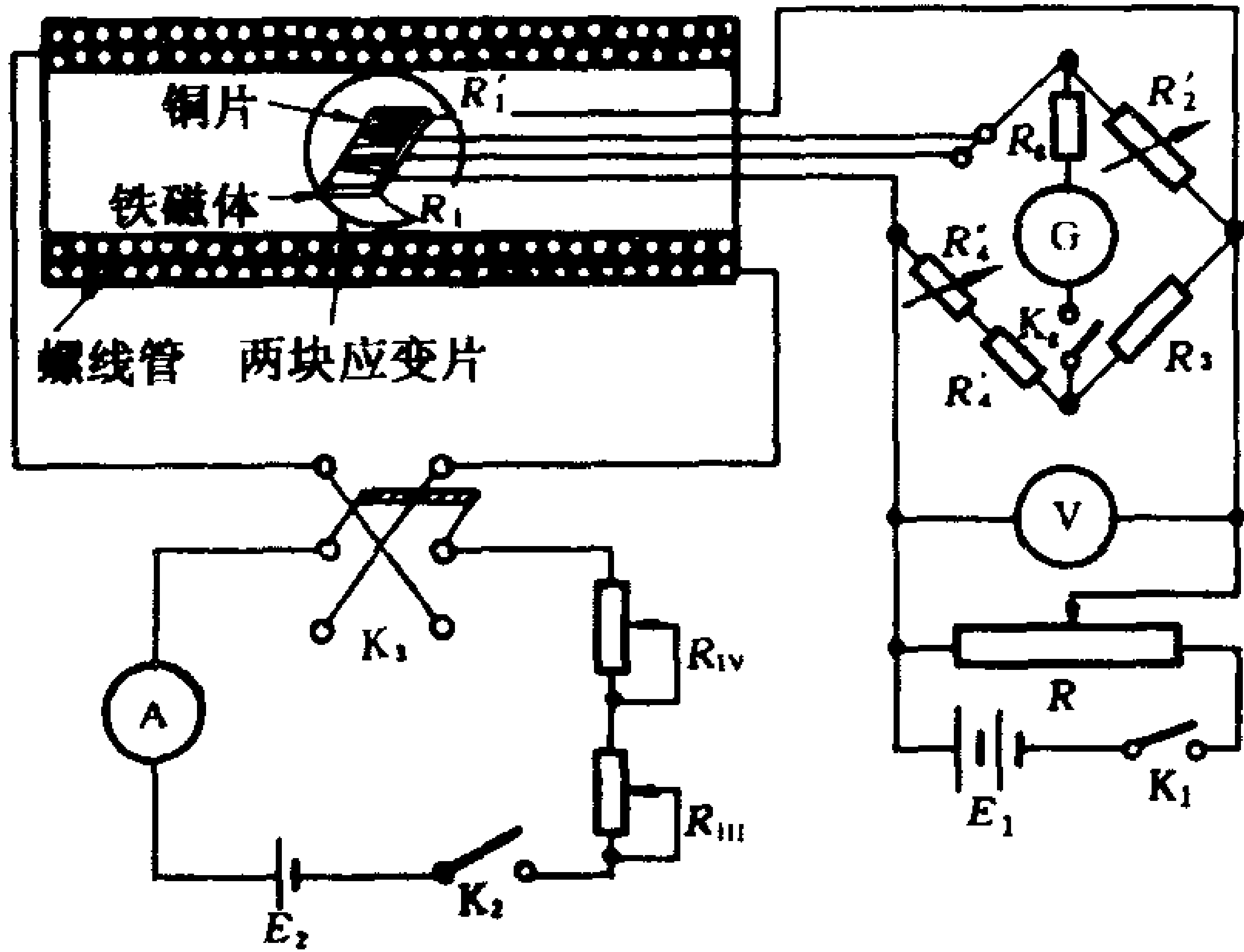


图 17-5 磁致伸缩测试电路图

实验内容

1. 先将铁磁体样品放入螺线管内,按图 17－4 进行交流退磁.

2. 按图 17－5 接好电路,调节 R''_4 和 R'_2 至电桥平衡,记下平衡时的 R'_2 值(即 R'_{20}).

3. 逐渐减小 R'_2 值,并读出相应的 α 值,根据 $\alpha-\dfrac{\Delta R'_2}{R'_{20}}$ 表格中的数据进行测量,并换算成 $\alpha-\dfrac{\Delta R}{R}$ 值,求出 $\overline{k}_3$ 值.

4. 先将滑线电阻放在最大位置,然后接通磁场电源,并逐渐调节滑线电阻,使电流单调上升,磁化电流在 0.400 A 以下测量点选得较密些,大于 0.400 A 每隔 0.100 A 测一次 α 值,计算 $\lambda\left(=\dfrac{\alpha}{k_3 S_l}\right)$ 和 $H(=k_0 I, k_0$ 由实验室给出).

5. 以 H 为横坐标,以 λ 为纵坐标作图.

6. 写出 $\lambda=f(H)$ 的经验公式.

首先根据实验曲线($\lambda-H$ 曲线)确定所属的基本函数类型,然后将非线性函数变换成线性函数,写出线性回归方程,参照绪论§2～§4 求出直线方程的二参数 a、b,最后求出 $\lambda=f(H)$ 的经验公式.

预习思考题

1. 本实验为什么采用非平衡电桥测电阻而不采用平衡电桥测电阻?
2. 什么叫做应变法测电阻? 应变片的灵敏系数的物理意义是什么?
3. 电流计偏转方向与 λ 有什么关系?
4. 为什么要测电桥灵敏度? 它与 λ 的测量有什么关系?
5. 怎样用实验的方法定出 α 与 $\dfrac{\Delta R_1}{R_1}$ 的关系?

复习思考题

1. 为什么将应变片 R'_1 贴在紫铜块上与贴在铁磁物质上的 R_1 同时放在螺线管中？又为什么在 R'_1 两端并联一只可变电阻箱？能否用一只可变电阻代替？

2. 在测试过程中能否改变 R'_2、R_3、R'_4、R''_4 的阻值？为什么？

3. 非平衡电桥与平衡电桥有什么区别？它有什么优点？试举出它的一个应用实例.

4. 怎样判断铁磁材料在加磁场后是伸长还是缩短？怎样验证？

5. 怎样由实验曲线来确定变量之间的关系？

6. 铁磁材料加磁场后伸长(或缩短)与所加磁场的正向与反向有关吗？试用实验证实之.

[附记]

I_g 与 ΔR 的关系推导

惠斯通电桥电路如图 17-6 所示，根据基尔霍夫定律(回路电流法)选择三个回路，列出三个方程：

ABEDA 回路：
$$(R_3+R_4+R_B)I_1-R_BI_2-R_3I_g=E \qquad (1)'$$

DEBCD 回路：
$$-R_BI_1+(R_1+R_2+R_B)I_2-R_2I_g=-E \qquad (2)'$$

ACBA 回路：
$$-R_3I_1-R_2I_2+(R_2+R_3+R_G)I_g=0 \qquad (3)'$$

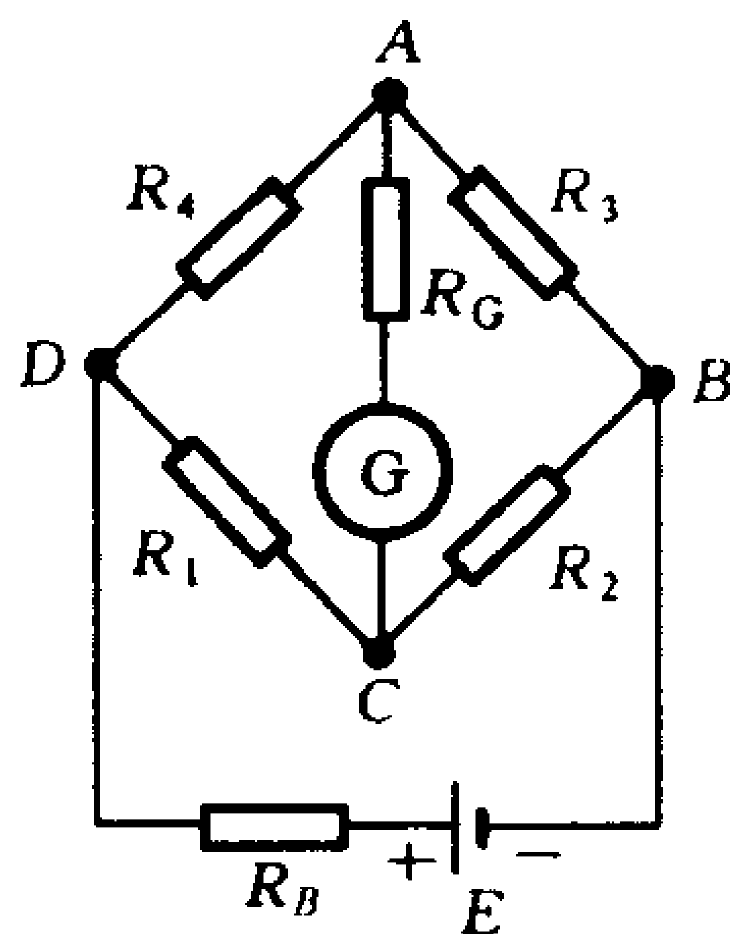


图 17-6 惠斯通电桥电路图

解联立方程：

$$I_g=\frac{\Delta'}{\Delta}$$

式中

$$\Delta=\begin{vmatrix} R_3+R_4+R_B & -R_B & -R_3 \\ -R_B & R_1+R_2+R_B & -R_2 \\ -R_3 & -R_2 & R_2+R_3+R_G \end{vmatrix} \qquad (4)'$$

$$\Delta' = \begin{vmatrix} R_3 + R_4 + R_B & -R_B & E \\ -R_B & R_1 + R_2 + R_B & -E \\ -R_3 & -R_2 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= E(R_1R_3 - R_2R_4) \tag{5'}$$

当 $R_1R_3 = R_2R_4$ 时，$\Delta'=0, I_g=0$，电桥处于平衡状态，

$$R_1 = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4 = R_{10}$$

当 $R_1 = \frac{R_2}{R_3}R_4 + \Delta R_1 = R_{10} + \Delta R_1$ 时，电桥处于不平衡，将 R_1 代入 Δ 和 Δ'，则有

$$\Delta' = E\left[\left(\frac{R_2}{R_3}R_4 + \Delta R_1\right)R_3 - R_2R_4\right] = ER_3\Delta R_1 \tag{6'}$$

而

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_3 + R_4 + R_B & -R_B & -R_3 \\ -R_B & R_1 + R_2 + R_B & -R_2 \\ -R_3 & -R_2 & R_2 + R_3 + R_G \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} R_3 + R_4 + R_B & -R_B & -R_3 \\ -R_B & R_{10} + R_2 + R_B & -R_2 \\ -R_3 & -R_2 & R_2 + R_3 + R_G \end{vmatrix}$$

$$+ \begin{vmatrix} R_3 + R_4 + R_B & 0 & -R_3 \\ -R_B & \Delta R_1 & -R_2 \\ -R_3 & 0 & R_2 + R_3 + R_G \end{vmatrix}$$

$$= \Delta_1 + \Delta_2 \tag{7'}$$

式中

$$\Delta_2 = \Delta R_1 \begin{vmatrix} R_3 + R_4 + R_B & -R_3 \\ -R_3 & R_2 + R_3 + R_G \end{vmatrix}$$

$$= [R_3(R_2 + R_G) + (R_4 + R_B)(R_2 + R_3 + R_G)]\Delta R_1$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} R_3 + R_4 + R_B & -R_B & -R_3 \\ -R_B & R_{10} + R_2 + R_B & -R_2 \\ -R_3 & -R_2 & R_2 + R_3 + R_G \end{vmatrix}$$

将第 2 列加至第 1 列,第 1、2 列相加后加至第 3 列可得

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} R_3 + R_4 & -R_B & R_4 \\ R_{10} + R_2 & R_{10} + R_2 + R_B & R_{10} \\ -R_2 - R_3 & -R_2 & R_G \end{vmatrix}$$

$$= \frac{R_3}{R_2}\begin{vmatrix} \frac{R_2}{R_3}(R_3 + R_4) & -\frac{R_2}{R_3}R_B & \frac{R_2}{R_3}R_4 \\ \frac{R_2}{R_3}R_4 + R_2 & \frac{R_2}{R_3}R_4 + R_2 + R_B & \frac{R_2}{R_3}R_4 \\ -R_2 - R_3 & -R_2 & R_G \end{vmatrix}$$

将第 1 行减去第 2 行则得

$$\Delta_1 =$$

$$\frac{R_3}{R_2}\begin{vmatrix} 0 & -\frac{R_2}{R_3}R_B - \left(\frac{R_2}{R_3}R_4 + R_2 + R_B\right) & 0 \\ \frac{R_2}{R_3}R_4 + R_2 & \frac{R_2}{R_3}R_4 + R_2 + R_B & \frac{R_2}{R_3}R_4 \\ -R_2 - R_3 & -R_2 & R_G \end{vmatrix}$$

$$= R_3\left(\frac{R_2}{R_3}R_B + \frac{R_2R_4}{R_3} + R_2 + R_B\right)\times$$

$$\left(\frac{R_4}{R_3}R_G + R_G + \frac{R_2}{R_3}R_4 + R_4\right)$$

$$I_g = \frac{\Delta'}{\Delta} = ER_3\Delta R_1 \Big/ \left\{\left[R_3\left(\frac{R_2}{R_3}\right)R_B + \frac{R_2R_4}{R_3} + R_2 + R_B\right]\times\right.$$

$$\left(\frac{R_4}{R_3}R_G + R_G + \frac{R_2}{R_3}R_4 + R_4\right)$$

$$\left. + \Delta R_1[R_3(R_2 + R_G) + (R_4 + R_B)(R_2 + R_3 + R_G)]\right\}$$

$$= E\Delta R_1 \Big/ \left\{ \left(\frac{R_2}{R_3} R_B + \frac{R_2 R_4}{R_3} + R_2 + R_B \right) \times \right.$$

$$\left. \left(\frac{R_4}{R_3} R_G + R_G + \frac{R_2}{R_3} R_4 + R_4 \right) \times (1 + k\Delta R_1) \right\} \quad (8)'$$

式中

$$k = \frac{R_3(R_2 + R_G) + (R_4 + R_B)(R_2 + R_3 + R_G)}{R_3\left(\frac{R_2}{R_3} R_B + \frac{R_2}{R_3} R_4 + R_2 + R_B\right)} \times$$

$$\frac{1}{\left(\frac{R_4}{R_3} R_G + R_G + \frac{R_2}{R_3} R_4 + R_4\right)} \quad (9)'$$

由 k 的表示式可知:

1. $k>0$,即它不是负数.

2. 当所有电阻都等于 R 时,

$$k = \frac{8R^2}{R(4R)(4R)} = \frac{1}{2R}$$

3. 当 R_G 和 R_B 与其他电阻相比可以略去,并且 $R_{10} = R_2 = R_3 = R_4$ 时.

$$k = \frac{3}{4}\left(\frac{1}{R_{10}}\right)$$

通常 k 值不比$\left(\frac{1}{R_{10}}\right)$大得多.

当电桥稍微不平衡时,必定有 $k\Delta R_1 \ll 1$,于是 I_g 正比于 ΔR_1,而且$\frac{I_g}{\Delta R_1}$为常量,由下式给出

$$\frac{I_g}{\Delta R_1} = \frac{E}{\left[R_B\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) + R_2 + \frac{R_2 R_4}{R_3}\right]} \times$$

$$\frac{1}{\left[R_G\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) + R_4\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\right]} = k_1 = \text{常量}$$

实验十八　霍耳效应

目的

1. 观察霍耳现象；

2. 了解应用霍耳效应测量磁场的方法；

3. 用电势差计测量霍耳电压及电流，进一步掌握电势差计的使用方法.

仪器和用具

霍耳片、低电势直流电势差计、标准电池、光点检流计、直流稳压电源，标准电阻、安培表、螺线管等.

原理

1. 霍耳效应

当电流通过一块导体或半导体制成的薄片时，载流子(即电荷携带者)的漂移运动方向和它所带电荷的正负号有关. 若载流子带正电荷，它的漂移运动方向即为电流方向；若载流子带负电荷，则它的漂移运动方向与电流方向相反.

若将这种通有电流的半导体薄片置于磁场中，并使薄片平面

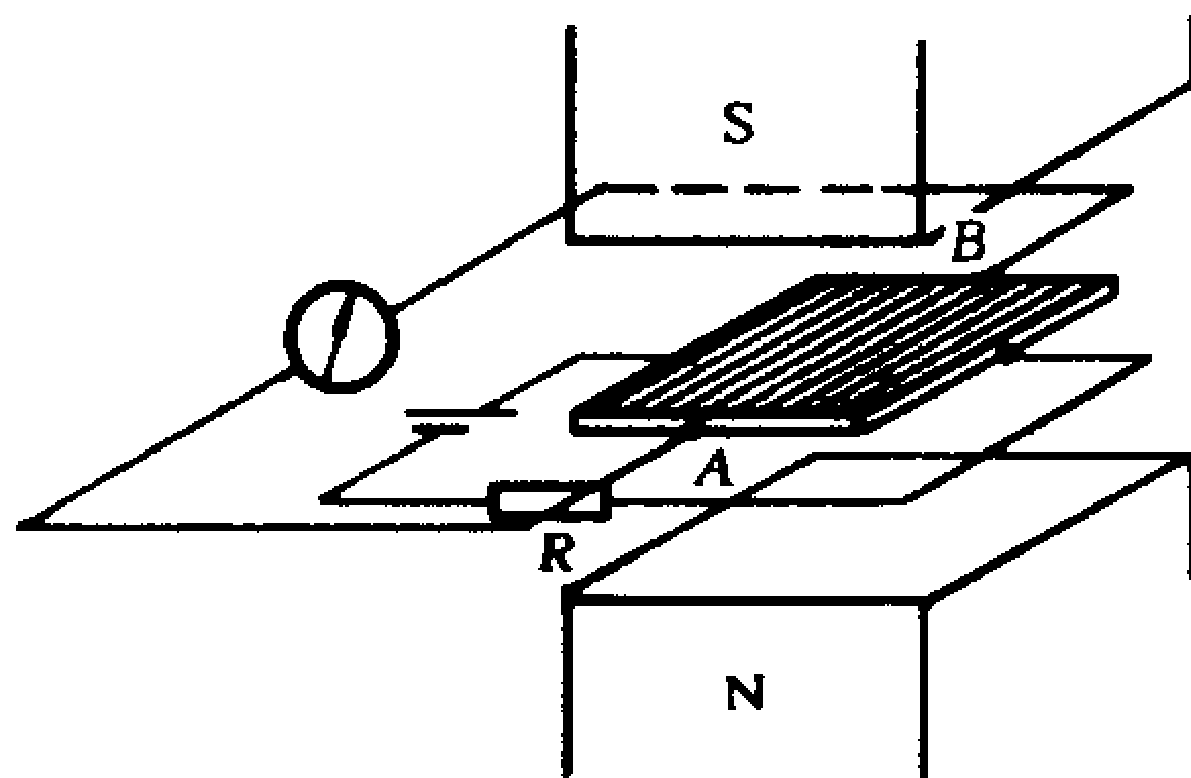


图 18－1

垂直于磁场方向，如图 18－1 所示．由于洛伦兹力的作用、载流子将向薄片侧边积聚．若载流子带正电荷，它将受到沿 x 方向的磁场作用力 F_m，如图 18－2(a)所示，导致 A 侧有正电荷积累，从而两侧出现电势差，且图中 A 点处电势比 B 点高．若载流子带负电荷，如图 18－2(b)所示，磁场作用力 F_m 的方向仍沿 x 轴方向，于是薄片的 A 侧将有负电荷积聚，使图中 A 点电势比 B 点低．这种当电流垂直于外磁场方向通过导体或半导体时，在垂直于电流和磁场的方向，物体两侧产生电势差的现象称为霍耳效应，出现的横向电势差称为霍耳电势差．

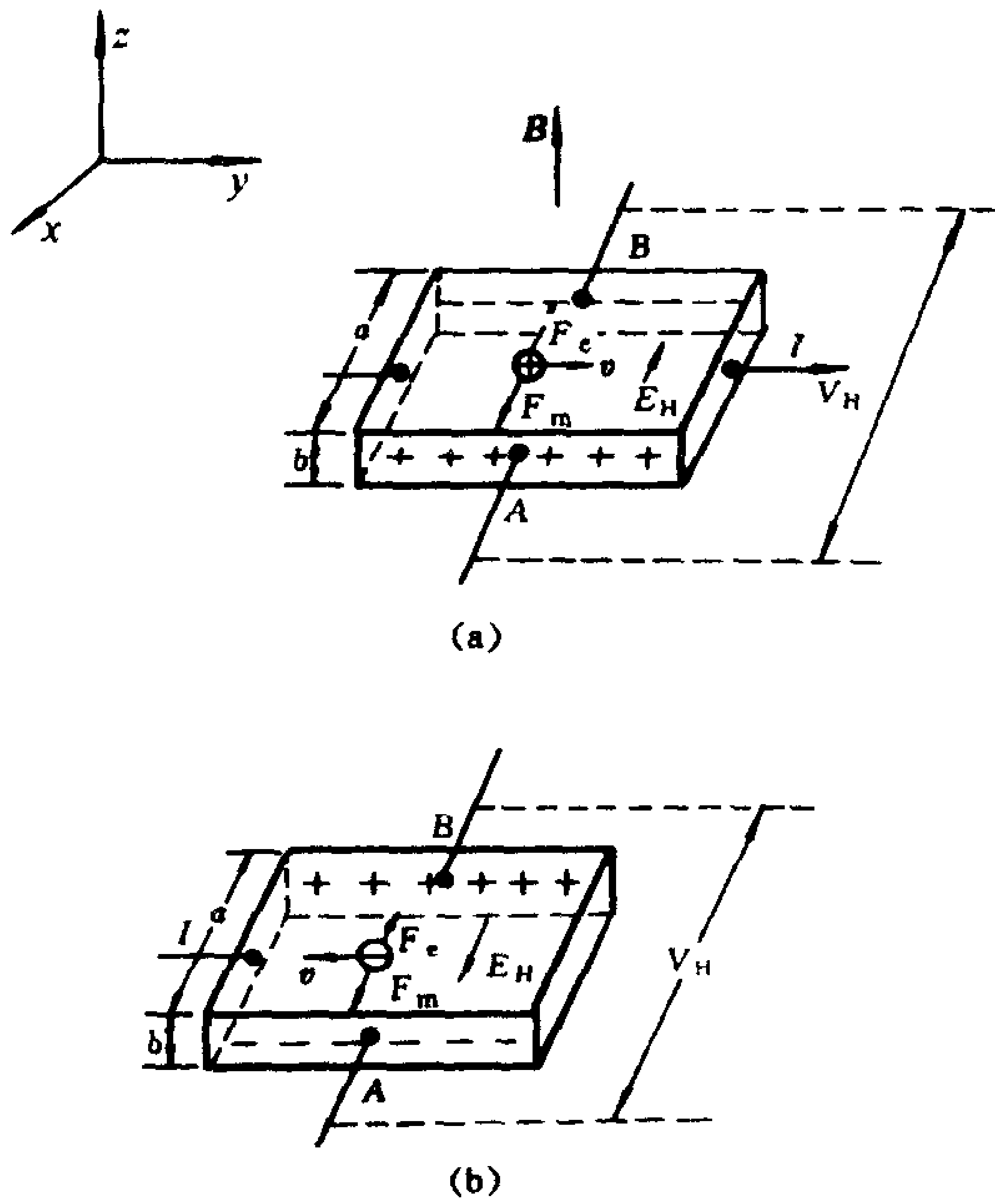


图 18－2　带电粒子受力图

当电流方向一定时，薄片中载流子的电荷符号决定了 A、B 两点横向电势差的符号．因此，通过 A、B 两点电势差的测定，可

以判断薄片中的载流子究竟是带正电荷还是带负电荷. 实验证实:大多数金属导体中的载流子带负电荷(即电子);半导体中的载流子有两种,带正电荷(即空穴)的称为 p 型半导体,而带负电荷(即电子)的称为 n 型半导体.

2. 霍耳电势差和磁场测量

在霍耳效应中,电量为 q,垂直磁场 B 的漂移速度为 v 的载流子,一方面受到磁场力

$$F_m = qvB \tag{18-1}$$

的作用,向某一侧面积聚;另一方面,在侧面上积聚的电荷将在薄片中形成横向电场 E_H,使载流子又受到电场力

$$F_e = qE_H \tag{18-2}$$

的作用. 电场力 F_e 的方向与磁场力 F_m 的方向恰好相反,它将阻碍电荷向侧面的继续积聚,因此载流子在薄片侧面的积聚不会无限止地进行下去. 在开始阶段,电场力比磁场力小,电荷将继续向侧面积聚. 随着积聚电荷的增加,电场不断增强,直到载流子所受的电场力与磁场力相等,即

$$F_e = F_m$$

时,达到一种平衡状态,载流子不再继续向侧面积聚. 此时薄片中的横向电场强度为

$$E_H = \frac{F_e}{q} = \frac{F_m}{q} = vB$$

设薄片宽度为 a、则横向电场在 A、B 两点间产生的电势差为

$$U_H = E_H a = vBa \tag{18-3}$$

因为

$$I = jab, \qquad j = qnv$$

所以

$$v = \frac{I}{nqab} \tag{18-4}$$

式中 n 为载流子浓度，j 为电流密度，故

$$E_{H} = \frac{IB}{nqab} \tag{18-5}$$

所以霍耳电势差

$$U_{H} = E_{H}a = \frac{IB}{nqb} \tag{18-6}$$

令

$$R_{H} = \frac{1}{nq}$$

为霍耳系数，则

$$U_{H} = R_{H}\frac{IB}{b}$$

所以霍耳系数等于

$$R_{H} = \frac{U_{H}b}{IB} \tag{18-7}$$

由式(18－6)、(18－7)可得出以下结论：

① 载流子若为电子，霍耳系数为负，则 $U_{H}<0$，反之载流子为空穴，霍耳系数为正，则 $U_{H}>0$. 若实验中能测得样品电流强度 I，磁感应强度 B、霍耳电势差 U_{H}、样品厚度 b 值，则可求出霍耳系数 R_{H} 值，根据 R_{H} 的正负可以判别半导体样品导电的类型，n 型样品 $R_{H}<0$，p 型样品 $R_{H}>0$.

② 霍耳电势差 U_{H} 与载流子浓度 n 成反比，薄片材料的载流子浓度 n 越大(霍耳系数 R_{H} 越小)，霍耳电势差 U_{H} 就越小. 一般金属中的载流子是自由电子，其浓度很大(约 $10^{22}/cm^{3}$)，所以金属材料的霍耳系数很小. 霍耳效应不显著. 但半导体材料的载流子浓度要比金属小得多，能够产生较大的霍耳电势差，从而使霍耳效应有了实用价值.

③ 根据 $R_{H} = \frac{1}{nq} = \frac{U_{H}b}{IB}$ 可得

$$n = \frac{IB}{U_H bq} \tag{18-8}$$

如果知道 U_H、I、B(由实验时测得)、b(由实验室给出),就可确定该材料的载流子浓度. 用这种方法也可研究浓度与温度的变化规律.

④ 对于确定的样品(a、b、q 一定),如果通过它的电流"I"维持不变,则霍耳电压和磁感应强度成正比. 我们可以从测得的 U_H 值求得外磁场的磁感应强度,因此霍耳片可用来制作测量磁场的仪器,即特斯拉计.

从(18-6)式可知

$$U_H = \left(\frac{1}{nqb}\right)(IB) \tag{18-9}$$

令

$$K_H = \frac{1}{nqb} \tag{18-10}$$

则

$$U_H = K_H IB \tag{18-11}$$

K_H 称为霍耳灵敏度,它决定了 I、B 一定时霍耳电势差的大小,其值由材料的性质及元件的尺寸决定,对一定的元件 K_H 是常量,单位为伏特每安培特斯拉,n 和 b 小的元件 K_H 较高. 式(18-11)说明对于 K_H 确定的元件,当电流 I 一定时,霍耳电势差 U_H 与该处的磁感应强度 B 成正比,因而可以通过测量霍耳电势差 U_H 而间接测出磁感应强度 B,即

$$B = \frac{U_H}{K_H I} \tag{18-12}$$

以上的讨论和结果都是在磁场与电流垂直的条件下进行的,这时霍耳电势差最大,因此测量时应转动霍耳片,使霍耳片平面与被测磁感应强度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的方向垂直. 这样测量才能得到正确的结果. 但测得的电势差除霍耳电压外还包括其他附加电势差,例如,由于霍耳电极位置不在同一等势面而引起的电势差 U_0,U_0

称为不等位电势差，它的符号随电流方向而变，与磁场无关；另外还有几个副效应引起的附加误差(详见附记). 由于这些电势差的符号与磁场、电流方向有关，因此在测量时改变磁场、电流方向就可以减少和消除这些附加误差，故取($+B$、$+I$)、($+B$，$-I$)、($-B$，$+I$)、($-B$，$-I$)四种条件下进行测量，将测量到的 U_H 取绝对值平均，作为测量结果.

实验内容

1. 确定样品的类型

按图 18-3 连接线路，图中 K_1 和 K_2 都是换向开关. 当 K_1 倒向左边，电势差计(UJ-31 型)测量 U_{DC}，倒向右边，则测量 U_{CD} 值.

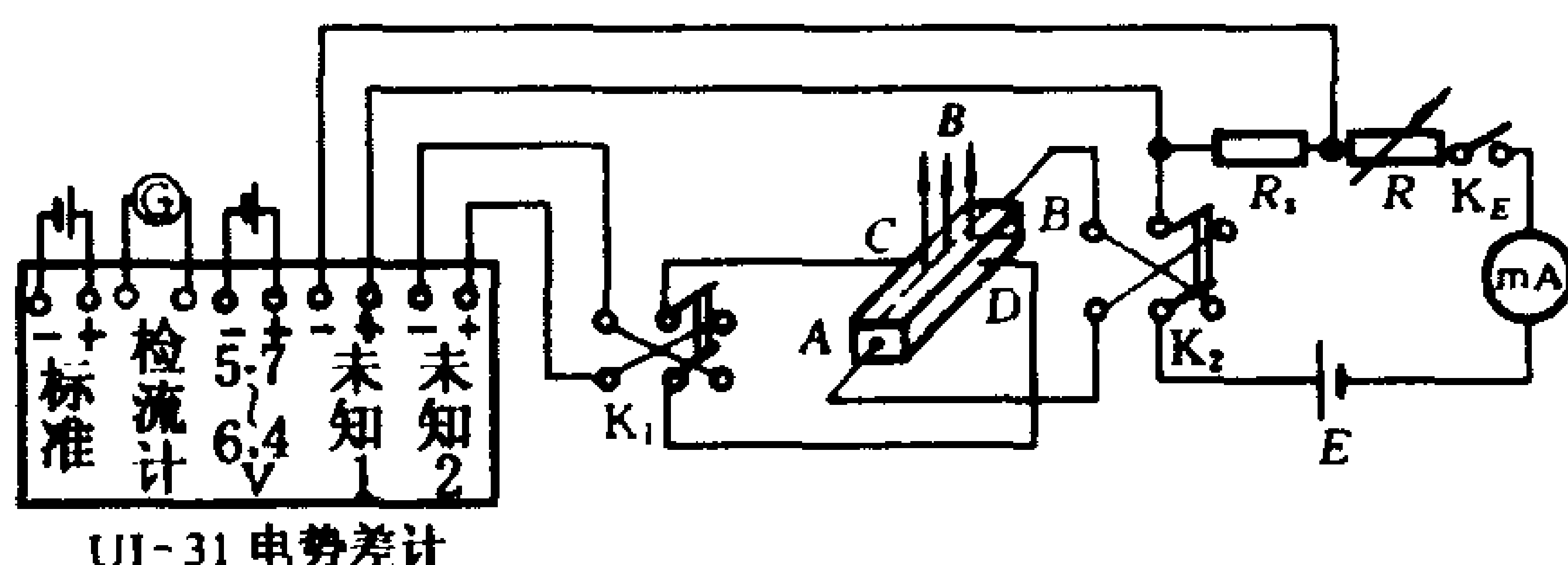


图 18-3 霍耳效应测试电路图

当 K_2 倒向右边，I 由 B 点流进，A 点流出，倒向左边，情况正好相反.

为了测量流过霍耳片的电流，可以先用电流表测，更精确的电流值可由测量标准电阻 R_s 上的电势差 U_{R_s} 除以 R_s 来求得，而 R_{R_s} 由 UJ-31 型的电势差计接“未知 1”进行测量.

为了使工作电流不超过霍耳元件的额定电流值，由可变电阻 R 进行限流调节.

根据测到的 U_{CD} 值可以确定霍耳元件的导电类型.

2. 霍耳系数 R_H、载流子浓度 n、霍耳灵敏度 K_H 的测定

取八种不同的电流值(注意勿超过霍耳片的额定电流值),在已知的恒定磁场中测量霍耳电压值,横坐标取 I 值、纵坐标取 U_H 值作图. 理论上得到一条通过坐标原点的倾斜直线,其斜率为 $R_H\dfrac{B}{b}$,根据已知的 B 和 b 值,可以求得 R_H 值. 或者求 U_H、I 两个变量的直线方程的二参数(截距和斜率),也可求得 R_H 值.

根据 $n=\dfrac{IB}{U_H bq}=\dfrac{1}{R_H q}$ 和已知载流子的电量(如:电子电量 $q=-1.6\times10^{-19}$ C)就可得到该材料的载流子浓度. 将霍耳元件垂直放入已知磁场中、由测得的电流和霍耳电压值 U_H 即可求出 K_H 值.

3. 利用霍耳效应测定长螺线管轴线上的磁场分布

测量线路如图 18-4 所示. 与图 18-3 相比较仅增加了一只螺线管和建立螺线管磁场用的电源.

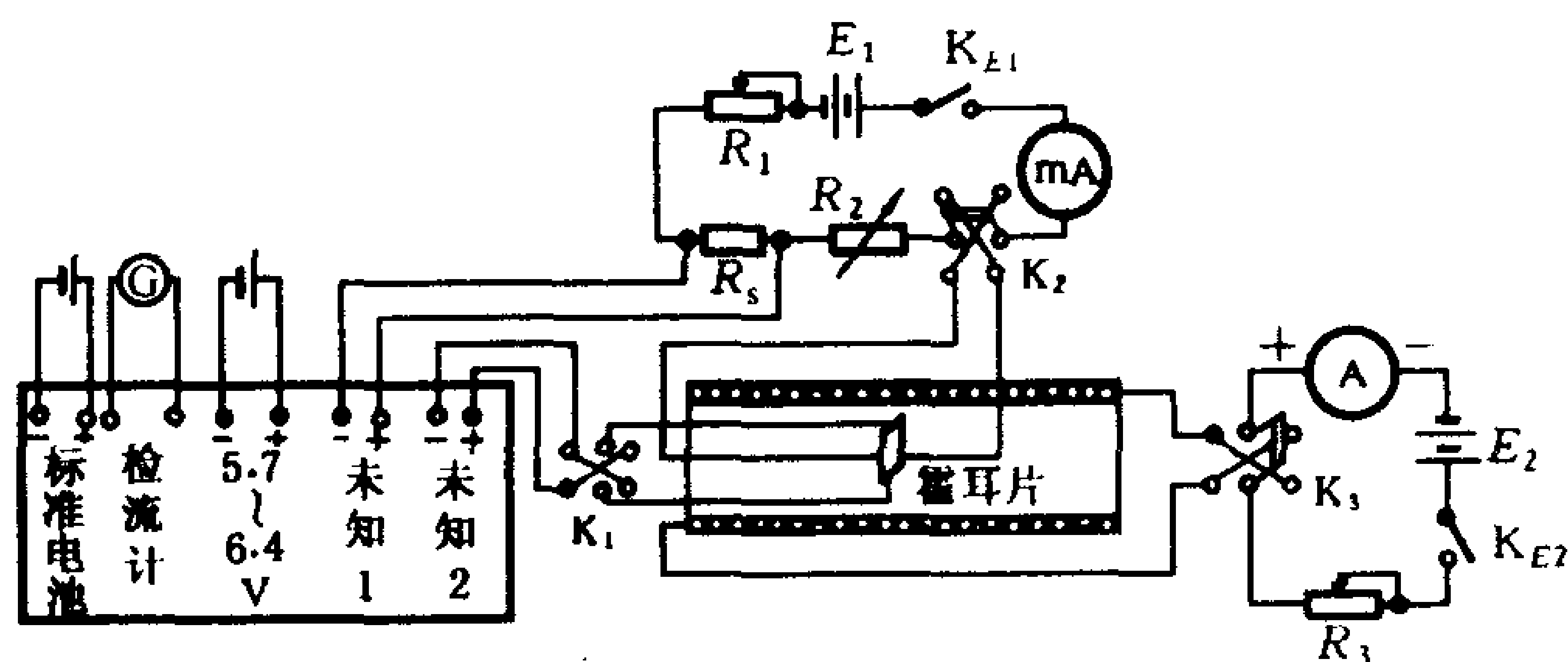


图 18-4　利用霍耳效应测螺线管磁场电路图

将由霍耳片做成的探头放入螺线管的中心轴上,接通螺线管电源,调节滑线变阻器 R_3,使得 $I=1.00$ A,则该点的磁感应强度为

$$B=\frac{U_H}{K_H I}=\frac{U_H R_s}{K_H U_{R_s}} \tag{18-13}$$

式中 U_H 和 U_{R_s} 由 UJ-31 型电势差计"未知 2"和"未知 1"进行

测定，K_H 为已测定值；R_s 为标准电阻的阻值；因此可以求得 B.

注意：U_H 一定要取四种条件下的绝对平均值.

移动霍耳片探头，从螺线管的中心到管口选测 10 个测试点，在磁场变化大的区域可多测几点，以掌握场强变化的规律.

以离开螺线管中心的距离 x 为横坐标，B/B_0 为纵坐标，螺线管轴上任一点的磁感应强度根据理论推导可得

$$B=\frac{\mu_0}{4\pi}2\pi nI(\cos\beta_1-\cos\beta_2)$$

$$=\frac{\mu_0}{2}nI(\cos\beta_1-\cos\beta_2) \qquad (18-14)$$

$$\cos\beta_1=\frac{x+\frac{l}{2}}{\sqrt{R^2+\left(x+\frac{l}{2}\right)^2}},$$

$$\cos\beta_2=\frac{x-\frac{l}{2}}{\sqrt{R^2+\left(x-\frac{l}{2}\right)^2}}$$

化简得到

$$B=C\left[\frac{x+\frac{l}{2}}{\sqrt{R^2+\left(x+\frac{l}{2}\right)^2}}-\frac{x-\frac{l}{2}}{\sqrt{R^2+\left(x-\frac{l}{2}\right)^2}}\right] \qquad (18-15)$$

式中 C 为常量. 当 $x=0$ 时，

$$B=B_0=C\frac{l}{\sqrt{R^2+\left(\frac{l}{2}\right)^2}}$$

因此 $$C = \frac{B_0\sqrt{R^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{l} = 常量$$

R 为螺线管的直径，l 为螺线管的总长度.

测量螺线管中心一点的磁场，并与实验值进行比较，计算其相对偏差.

(18-15)式表示螺线管轴线磁场的分布，该式也可写作

$$\frac{B}{B_0} = \frac{\sqrt{R^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{l} \times \left[\frac{x + \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(x + \frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{x - \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2}}\right] \quad (18-16)$$

$\frac{B}{B_0}$与 x 的数据关系如表 18-1 所示，曲线如图 18-5 所示. 试将实验曲线与理论曲线进行比较，或者用最小二乘法计算磁感应强度 B 的实验值和理论值的相关系数 R_e，回归方程的参数 a 和 b.

表 18-1 $\frac{B}{B_0}$与 x 的关系($R = 5.0$ cm, $l = 50.0$ cm)

x/cm	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5
B/B_0	0.999 6	0.997 8	0.994 5	0.988 7	0.979 0
x/cm	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0
B/B_0	0.962 2	0.930 8	0.867 5	0.735 3	0.507 0
x/cm	27.5	30.0	32.5	35.0	37.5
B/B_0	0.279 6	0.147 3	0.083 7	0.052 1	0.034 9
x/cm	40.0	42.5	45.0	47.5	50.0
B/B_0	0.024 7	0.018 2	0.013 9	0.010 9	0.008 8

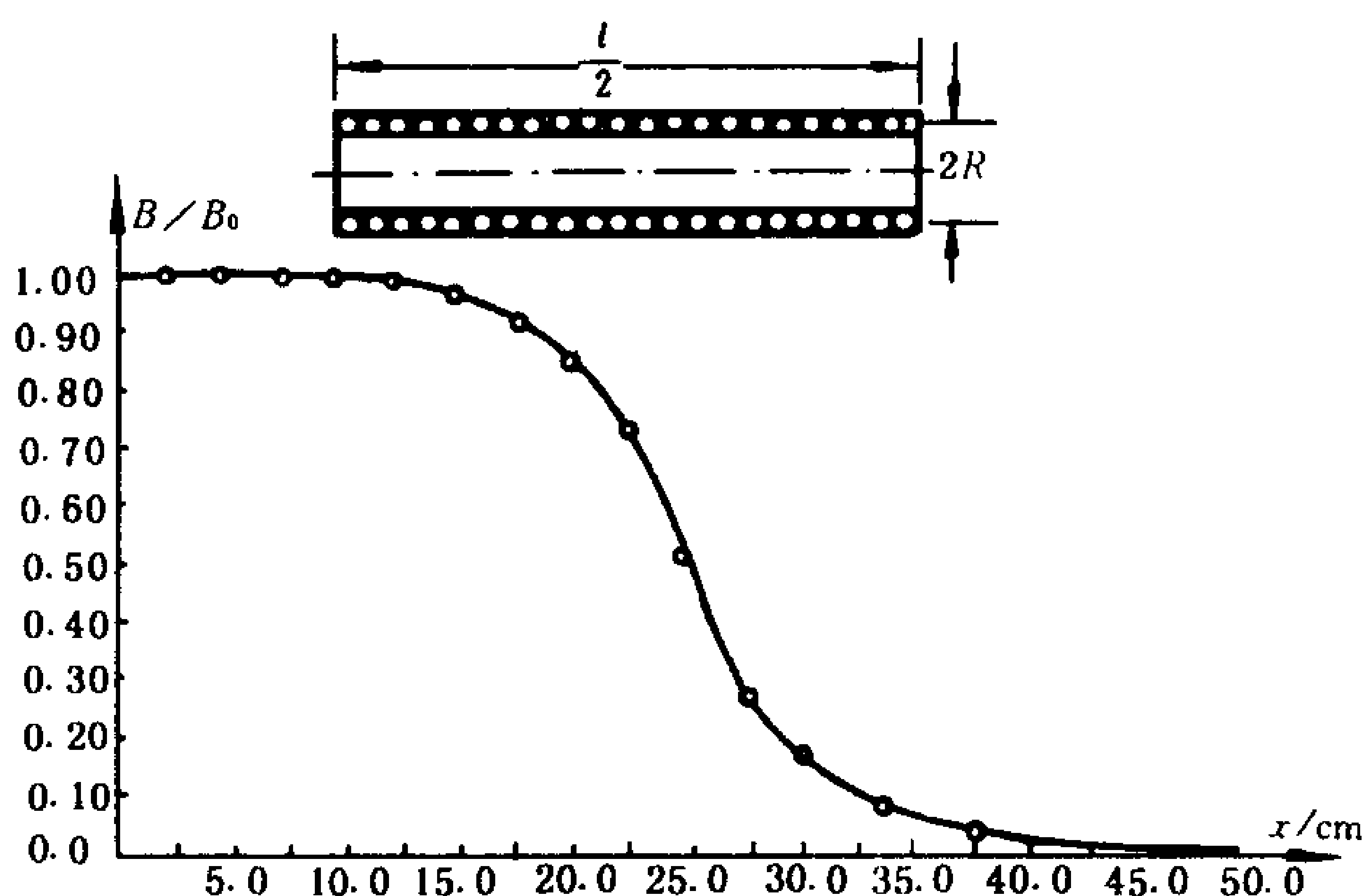


图 18－5　B/B_0-x 分布曲线

预习思考题

1. 什么叫做霍耳效应？为什么此效应在半导体中特别显著？
2. 怎样确定载流子电荷的正负？
3. 怎样利用霍耳效应测定磁场？
4. 用电势差计测量电势差的原理是什么？怎样操作？
5. 如何测定霍耳灵敏度？

复习思考题

1. 用霍耳片测螺线管内磁场时，怎样消除地球磁场的影响？
2. 如何判断磁场 B 的方向与霍耳片的法线是否一致？它对实验有何影响？
3. 利用霍耳效应能测量交变磁场吗？画出线路图并写出测试方法.
4. 试分析霍耳效应测磁场的误差来源.
5. 利用霍耳片能测间隙磁场吗？它对霍耳片的尺寸与在磁场之中放置的位置有何要求？

[附记]

在测量霍耳电势差 U_H 时,不可避免地会产生一些副效应,由于这些副效应产生的附加电势差叠加在霍耳电势上,形成了测量中的系统误差. 这些副效应有:

[1] 不等位电势差 U_0

由于在工艺制作时,很难将电势电极(A、B)焊在同一等势面上,因此当电流流过样品时,即使不加磁场,在电势电极 A 和 B 间也会产生一电势差.

$U_0 = Ir$(r 是沿 x 轴方向 AB 间的电阻). 这电势差称为不等位电势差,它显然只与电流有关,而与磁场无关.

[2] 爱廷豪森效应

当样品的 x 方向通以电流,z 方向加一磁场时,由于霍耳片内部的载流子速度服从统计分布,有快有慢,在磁场的作用下慢速的载流子与快速的载流子将在洛伦兹力和霍耳电场的共同作用下,沿 y 轴向相反的两侧偏转. 向两侧偏转的载流子的动能将转化为热能,使两侧的温升不同,因而造成在 y 方向上两侧的温度差($T_A - T_B$). 因为霍耳电极和样品两者材料不同,电极和样品就形成温差电偶,这一温差在 A、B 间就产生温差电动势 U_E,

$$U_E \propto IB.$$

U_E 的正、负、大小与 I、B 的大小和方向有关. 这一效应称爱廷豪森效应.

[3] 能斯脱效应

由于两个电流电极与霍耳样品的接触电阻不同,样品电流在两电极处将产生不同的焦耳热,引起两电极间的温差电动势,此电动势又产生温差电流(称为热电流)Q,热电流在磁场的作用下将发生偏转,结果在 y 方向上产生附加的电势差 U_N,且

$$U_N \propto QB.$$

这一效应称为能斯脱效应.

[4] 里记－勒杜克效应

以上谈到的热流 Q 在磁场的作用下，除了在 y 方向产生电势差外，还将在 y 方向上引起样品两侧的温差，此温差又在 y 方向上产生附加温差电动势

$$U_R \propto QB$$

U_R 只和 B 有关，和 I 无关.

以上四种副效应所产生的电势差总和，有时甚至远大于霍耳电势差，形成测量中的系统误差，以致使霍耳电势差难以测准. 为了减少和消除这些效应引起的附加电势差，我们利用这些附加电势差与样品电流 I、磁场 B 的关系：

当$(+B、+I)$时，

$$① \ U_{(AB)_1} = U_H + U_0 + U_E + U_N + U_R$$

当$(+B、-I)$时，

$$② \ U_{(AB)_2} = -U_H - U_0 - U_E + U_N + U_R$$

当$(-B、-I)$时，

$$③ \ U_{(AB)_3} = +U_H - U_0 + U_E - U_N - U_R$$

当$(-B、+I)$时，

$$④ \ U_{(AB)_4} = -U_H + U_0 - U_E - U_N - U_R \quad (18-17)$$

作如下运算

①－②＋③－④，并取平均值，则得

$$\frac{1}{4}[U_{(AB)_1} - U_{(AB)_2} + U_{(AB)_3} - U_{(AB)_4}] = U_H + U_E \quad (18-18)$$

这样，除了爱廷豪森效应以外其他副效应产生的电势差全部消除了，而爱廷豪森效应所产生的电势差 U_E 要比 U_H 小得多. 所以将实验测出的 $U_{(AB)_1}$、$U_{(AB)_2}$、$U_{(AB)_3}$、$U_{(AB)_4}$ 值代入(18－18)式，即可基本消除副效应引起的系统误差.

实验十九　温差电偶的定标

目的

1. 加深对温差电现象的理解；
2. 了解温差电偶测温的基本原理和方法；
3. 进一步掌握用电势差计测量电势差.

仪器和用具

箱式电势差计、温差电偶、自耦变压器、电炉、坩埚、标准电池、检流计，待测温差电偶、冰、水、纯锡、纯锌、及待测熔点的金属(焊锡).

原理

1. 温差电效应

在物理测量中，经常将非电学量如温度、时间、长度等转换为电学量来进行测量，这种方法叫做非电量的电测法. 其优点是不仅使测量方便、迅速、而且可提高测量精密度. 温差电偶是利用温差电效应制作的测温元件，在温度测量与控制中有广泛的应用. 本实验是研究一给定温差电偶的温差电动势与温差的关系.

如果用A、B两种不同的金属构成一闭合电路，并使两接点处于不同温度，如图19－1所示，则电路中将产生温差电动势，并且有温差电流流过，这种现象称为温差电效应.

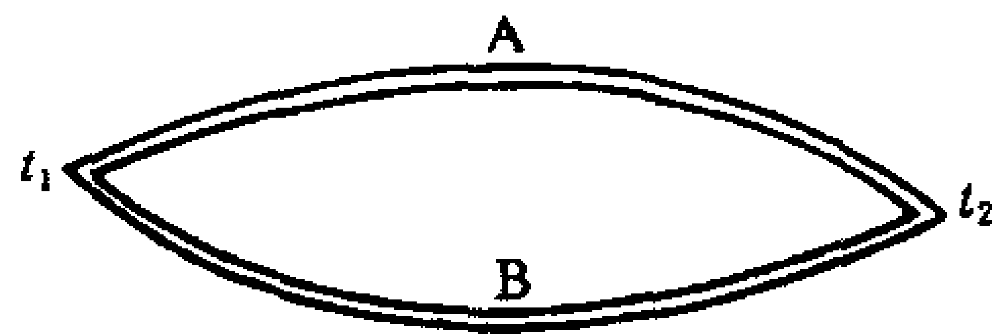


图19－1　温差电动势

2. 温差电偶

两种不同金属串接在一起，其两端可以和仪器相接进行测温(图19－2)的元件称为温差电偶. 温差电偶的温差电动势与二接

头温度差之间的关系比较复杂，但是在较小温差范围内可以近似认为温差电动势 E_t 与温度差 $(t-t_0)$ 成正比，即

$$E_t = c(t - t_0) \tag{19-1}$$

式中 t 为热端的温度，t_0 为冷端的温度，c 称为温差系数（或称温差电偶常量）单位为 $\mu V \cdot ℃^{-1}$，它表示二接点的温度相差 1 ℃ 时所产生的电动势，其大小取决于组成温差电偶材料的性质，即

$$c = \frac{k}{e}\ln\frac{n_{0A}}{n_{0B}} \tag{19-2}$$

式中 k 为玻耳兹曼常量，e 为电子电量，n_{0A} 和 n_{0B} 为两种金属单位体积内的自由电子数目.

如图 19-2 所示，温差电偶与测量仪器有两种联接方式：(a) 金属 B 的两端分别和金属 A 焊接，测量仪器 M 插入 A 线中间；(b) A、B 的一端焊接，另一端和测量仪器联接.

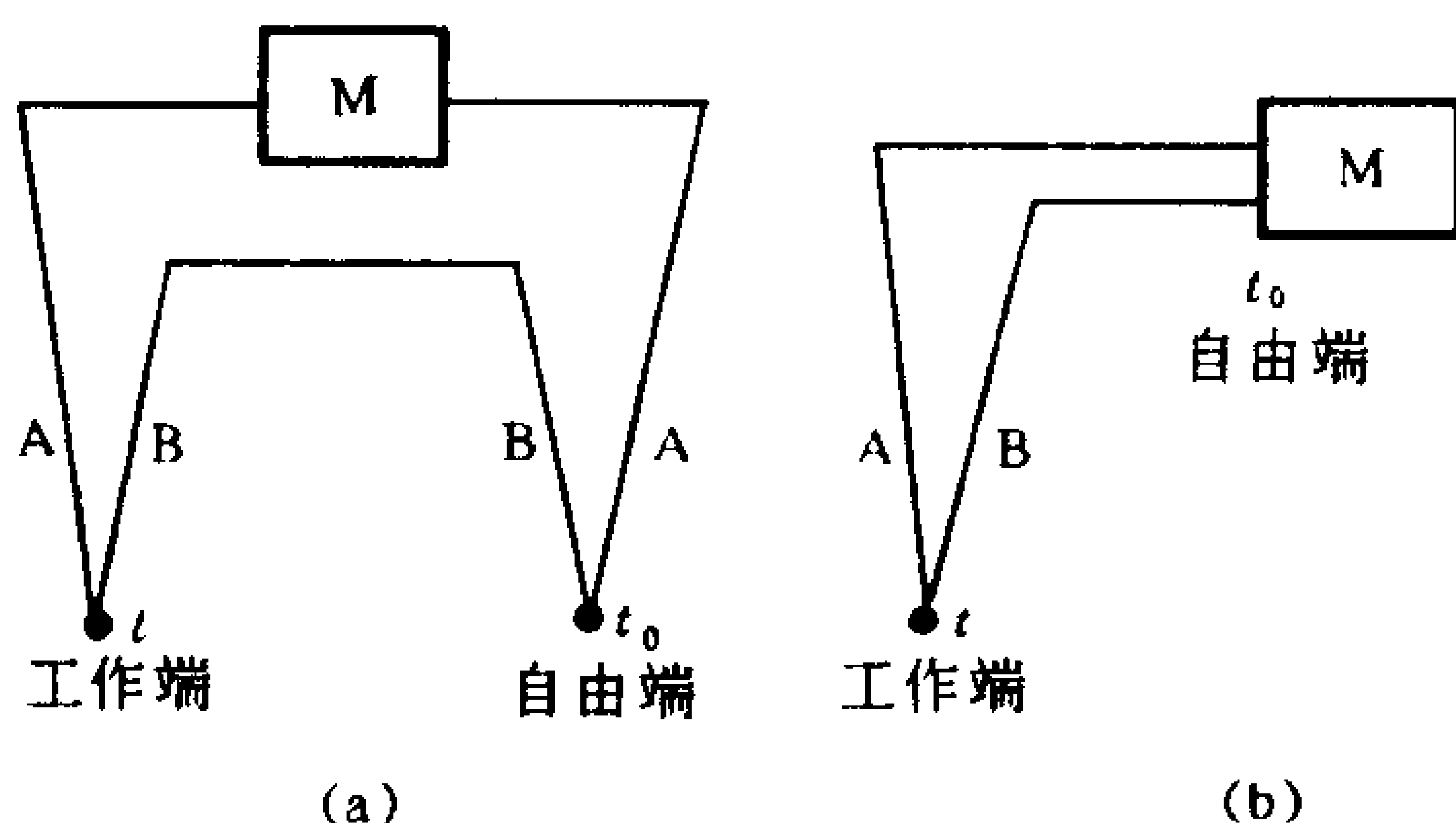


图 19-2

在使用温差电偶时，总要将温差电偶接入电势差计，这样除了构成温差电偶的两种金属外，必将有第三种金属接入温差电偶电路中，理论上可以证明，在 A、B 两种金属之间插入任何一种金属 C，只要维持它和 A、B 的联接点在同一个温度，这个闭合电路中的温差电动势总是和只由 A、B 两种金属组成的温差电偶中的温差电动势一样.

温差电偶的测温范围可以从 4.2 K(-268.95 ℃) 的深低温直

至2 800 ℃的高温. 必须注意,不同的温差电偶所能测量的温度范围各不相同(参看附记).

3. 温差电偶的定标

利用温差电偶测量温度时必须进行定标,所谓定标就是设法确定温差电势的大小与温度差的对应关系.定标有两种方法,一是固定点法. 它是在一定的气压下把一些物质的熔点或沸点作为已知温度,测出这些已知温度对应 t_0 的温度电动势(如图 19－3 中1、2 点),利用内插法就可定出固定点之间任何一个温度 t 对应 t_0 的温差电动势 E_t,即

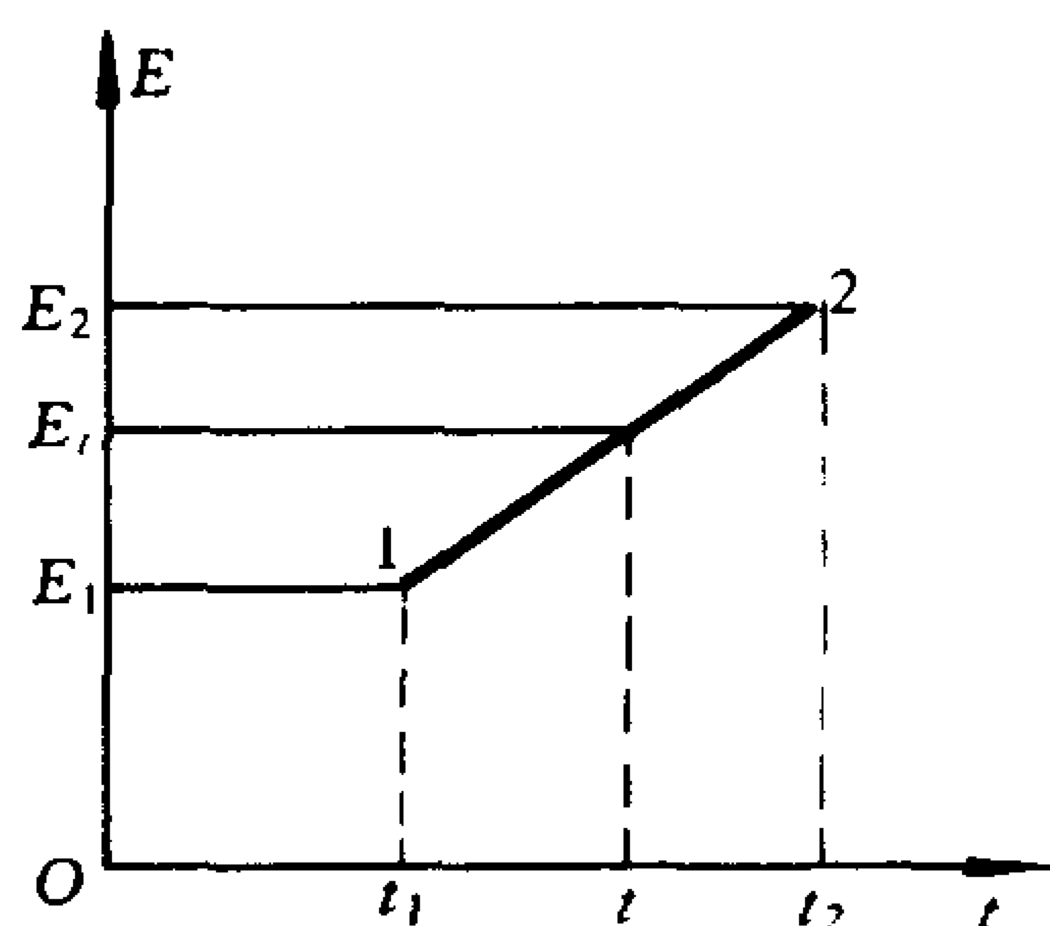


图 19－3

$$E_t = E_1 + \frac{E_2 - E_1}{t_2 - t_1}(t - t_1) \qquad (19-3)$$

这种方法的优点是校准温度准确,缺点是在一般情况下合适的纯物质为数不多,故校准点的数目比较少,而在较大温度范围,用式(19－3)作线性内插误差较大.

另一种定标法称为比较法,即利用某一已经校准过的温差电偶或温度计与未知温差电偶测量同一温度,从而校准未知温差电偶. 此法简单、迅速,但准确度受标准温差电偶或温度计准确度的限制.

定标工作的结果可以列表表示,表 19－1 为铜－铁温差电偶的定标值,也可以作定标线($(E, t - t_0)$图线),还可以将定标值用一经验公式描述.

表 19－1　铜－铁温差电偶定标测定例

t/℃	85	123	140	160	184	209	230
E/mV	0.842	1.123	1.220	1.342	1.442	1.500	1.534

本实验是用固定点法校准镍铬－镍硅温差电偶[①],图 19－4 为测量仪器布置示意图.

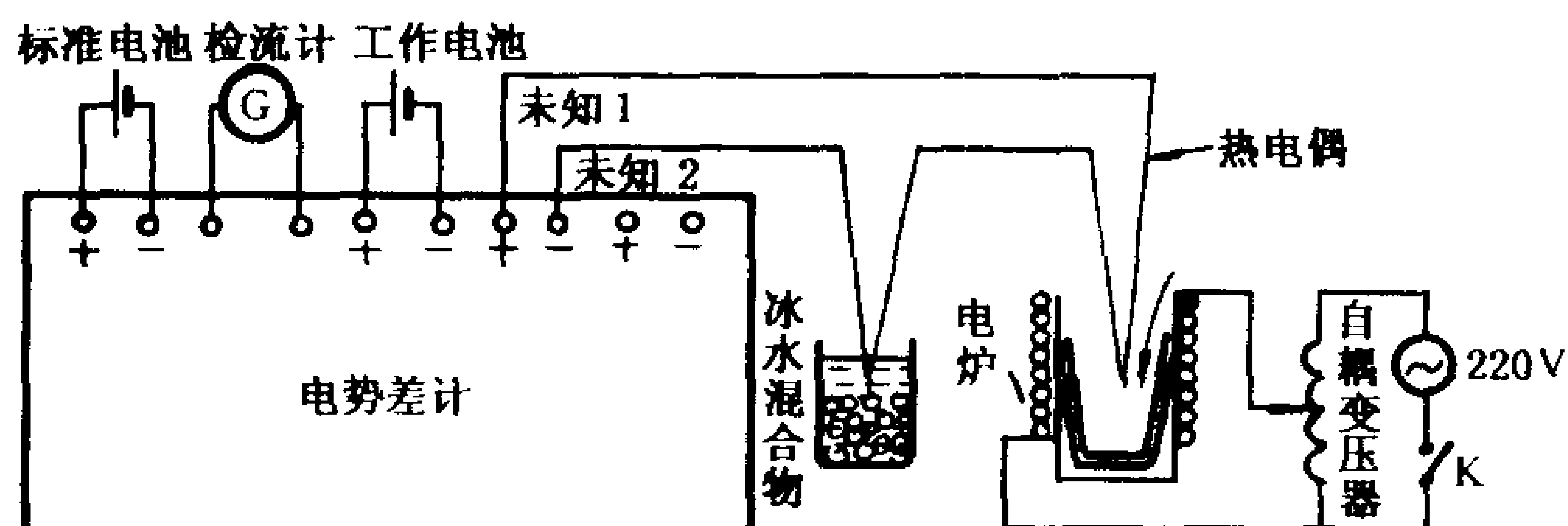


图 19－4

实验内容

1. 按图 19－4 接好电路,用电势差计测定温差电动势,首先对电势差计进行校正. 先将电势差计拨向“校正”,然后调节滑线电阻的“粗”、“中”、“细”,以调节工作电流,使检流计指示为零,在测量过程中要不断地对电势差计进行校正(参照实验八及其附记).

2. 将温差电偶的测温端和冷端均置于冰、水混合物中测定温差电动势.

3. 将温差电偶的测温端置于室温,测定温差电动势,并记下温度计的读数.

4. 接通电炉电源,将水加热到沸点,记下它所对应的温差电

① 也可用铜－康铜温差电偶,以校准过的水银温度计为准,用比较法测 300 ℃以下的油温去定标.

动势.

5. 将盛有纯锡的坩埚,放入电炉的炉膛内,将温差电偶及其保护套一起插入锡中,加热到完全熔化,切断加热电源后,不断观察热电动势的变化情况,开始温差电动势减少,以后有约 2～3 分钟时间温差电动势保持不变,这是由于液态锡在凝固期内温度保持不变,温差电动势也就不变,它所对应的温度即为锡的熔解点,记下这时的温差电动势.

6. 以同样方法测定锌在凝固时的温差电动势.

7. 以同样方法测定焊锡凝固时的温差电动势.

8. 以温差电偶两端点的温差作横坐标,温差电动势为纵坐标作定标曲线,并用作图法定出温差系数.

9. 由定标曲线查出焊锡的凝固点对应的温度.

预习思考题

1. 怎样校正电势差计?

2. 怎样测量电势差? 本实验测什么物质的沸点及熔点?

3. 两金属接触为什么会产生电势差? 什么叫做温差电动势? 它与哪些因素有关?

4. 温差电偶的定标曲线应如何作? 怎样用温差电偶的定标曲线来确定被测物的温度?

5. 怎样判断温差电偶的正、负端?

复习思考题

1. 电势差计作为第三种导体接入温差电偶两种导体之间为什么对测量无影响?

2. 测定温差电偶定标曲线为什么不能采用任意温度定点,而是取某些物质的三相点、凝固点或沸点?

3. 实际使用温差电偶时,冷端并不放入冰水中,而放在室温的空气中,那么如何使用温差电偶的定标曲线来定出热端对应的温度?

4. 水银温度计测温与温差电偶测温各有什么优缺点?

[附记]

1. 自由端(冷端)温度补偿

实际使用温差电偶时,需要利用已知的定标曲线来测定未知温度,而温差电偶的温度-温差电动势的定标曲线是在冷端温度 t_0 为 0 ℃时分度的,但实际应用时冷端往往不在 0 ℃,例如,冷端保持在室温 t'_0,这样必然会引起测量误差,故必须进行修正.可用计算法加以修正,即查出由于冷端温度自 0 ℃增加到 t'_0 时的温度差($t'_0 - t_0$)所产生的温差电势 $E(t'_0 - t_0)$,再加以冷端温度为 t'_0 时测得的温差电动势 $E(t, t'_0)$,即

$$E(t, t_0) = E(t'_0 - t_0) + E(t - t'_0)$$

然后根据温差电动势 $E(t, t'_0)$值,从温度-温差电动势定标曲线中查出对应的温度值.

2. 温差电偶定标曲线是采用定点法来确定的,由于某些物质在平衡态时有完全确定的温度(三相点),因此可以作为温差电偶定标曲线的定点.

国际实际温标采用的基本固定点(在 101 325 Pa 下定点)列表如下:

表 19-2

基准点	温度/℃	基准点	温度/℃
氧的沸点	-182.97	铅的凝固点	327.5
水的三相点	+0.01	硫的沸点	444.60
冰的融点	0.00	锌的凝固点	419.51
水的沸点	100.00	银的凝固点	960.80
锡的凝固点	231.91	金的凝固点	1 063.0

3. 对温差电偶材料的性能要求

(1) 使用温度范围广,要具有足够大的温差电动势与温差系数,且要求它们与温度成单值线性或接近线性的函数关系.

(2) 在测温范围以内应有足够的物理、化学的稳定性和良好的抗氧化性能,并在使用温度范围内不发生相变.

(3) 温差电偶的导电率要高,电阻温度系数要小.

(4) 热特性的稳定性、均匀性及复现性好.

(5) 复制性要好,机械强度要高,制造简单、价格便宜.

4. 常用温差电偶特性表

表 19-3

温差电偶材料		短期工作最高温度	推荐工作温度	允许误差	主要特点	用途
正极	负极					
铂铑	铂	1 600 ℃	1 000~1 300 ℃	≤600 ℃ ±2.4 ℃ >600 ℃ ±0.4% t	它属于贵重金属温差电偶. 其物理、化学稳定性好,它在氧化物气体中有相当好的稳定性,但在金属蒸气、二氧化硅及碳氢等还原介质中易遭受损害,此时要使用可靠的保护套管. 其缺点为温差电势较小,其温差电势与温度之间并非严格的线性,可以用图表或下列方程式表示: $E_t = a + bt + ct^2$ 其中 a、b、c 为常数. 对于基准热电偶取锑、银、及金三种金属的熔点温度确定 a、b、c 之值	一般用于精密高温测试. 此温差电偶被规定在 630.74~1 064 ℃范围内复现国际温标. 可作一、二等级的标准温度传递. 也可作工业用温差电偶,如各种金属熔炼、高温热处理炉、及其他高温测量
镍铬	镍硅	1 200 ℃	600~1 000 ℃	≤400 ℃ ±3 ℃ >400 ℃ ±0.75% t	在廉价金属温差电偶中具有最好的抗氧化性能	有色金属熔炼、各种高温热处理炉、加热炉

续表

温差电偶材料		短期工作最高温度	推荐工作温度	允许误差	主要特点	用途
正极	负极					
镍铬	镍铝	1 200 ℃	600～1 000 ℃	≤400 ℃ ±3 ℃ >400 ℃ ±0.75% t	它是在非贵重金属温差电偶中性能最稳定的一种．应用很广，因在电极中含有大量的镍，故在高温下抗氧化及抗腐蚀能力很强，在高温下也易受还原性气体影响，但在 500 ℃ 以下可以用，在相同温度下其温差电势是铂铑－铂温差电偶的 4～5 倍，而且线性度更好，由于它为非贵重金属故电极可做得粗些，从而寿命长、强度大，阻值小	有色金属熔炼、各种高温热处理炉，加热炉，及航空、石油、化工等高温测量，可用于核场中测温
铜	康铜	300 ℃	0～300 ℃	－40～100 ℃ ±0.8 ℃ 100～300 ℃ ±0.75% t 精密级误差减半	均匀性和稳定性都较好．在潮湿空气中有抗蚀性．由于康铜丝复制性较差，所以制成的温差电偶刻度特性则不太一致	这是一种应用较多的非标准分度温差电偶，它一般用于实验室及科研中
镍铝	康铜	800 ℃	0～600 ℃	≤400 ℃ ±3 ℃ >400 ℃ ±0.75% t	它是温差电势最大的一种温差电偶(在 600～0 ℃ 时有 66.4 mV．也有近似线性的刻度特性	化工等生产中测温

实验二十　电子示波器的使用

目的

1．了解通用示波器的结构和工作原理；

2．初步掌握通用示波器各个旋钮的作用和使用方法；

3．学习利用示波器观察电信号的波形，测量电压、频率和相位．

仪器和用具

通用示波器、音频信号发生器、晶体管毫伏表、数字频率计．

原理

电子示波器（阴极射线示波器）简称为示波器，它可显示电信号变化过程的图形（又称波形），又可显示两个相关量的函数图形．由于电学量、磁学量和各种非电量转换来的电信号均可利用示波器进行观察和测量，所以示波器是现代科学技术各领域中应用非常广泛的测量工具．

一、示波器的构造和工作原理

最简单的示波器应包括以下五个部分（如图 20－1 所示）：①示波管，②扫描发生器，③同步[①]电路，④水平轴和垂直轴放大器，⑤电源供给．下面分别加以简单说明：

1．示波管

示波管是示波器进行图形显示的核心部分，在一个抽成高真空的玻璃泡中，装有各种电极（图 20－2），按其功能可分为三部分．

---

① 也可称为"整步"或者"同期"，其意思一样．

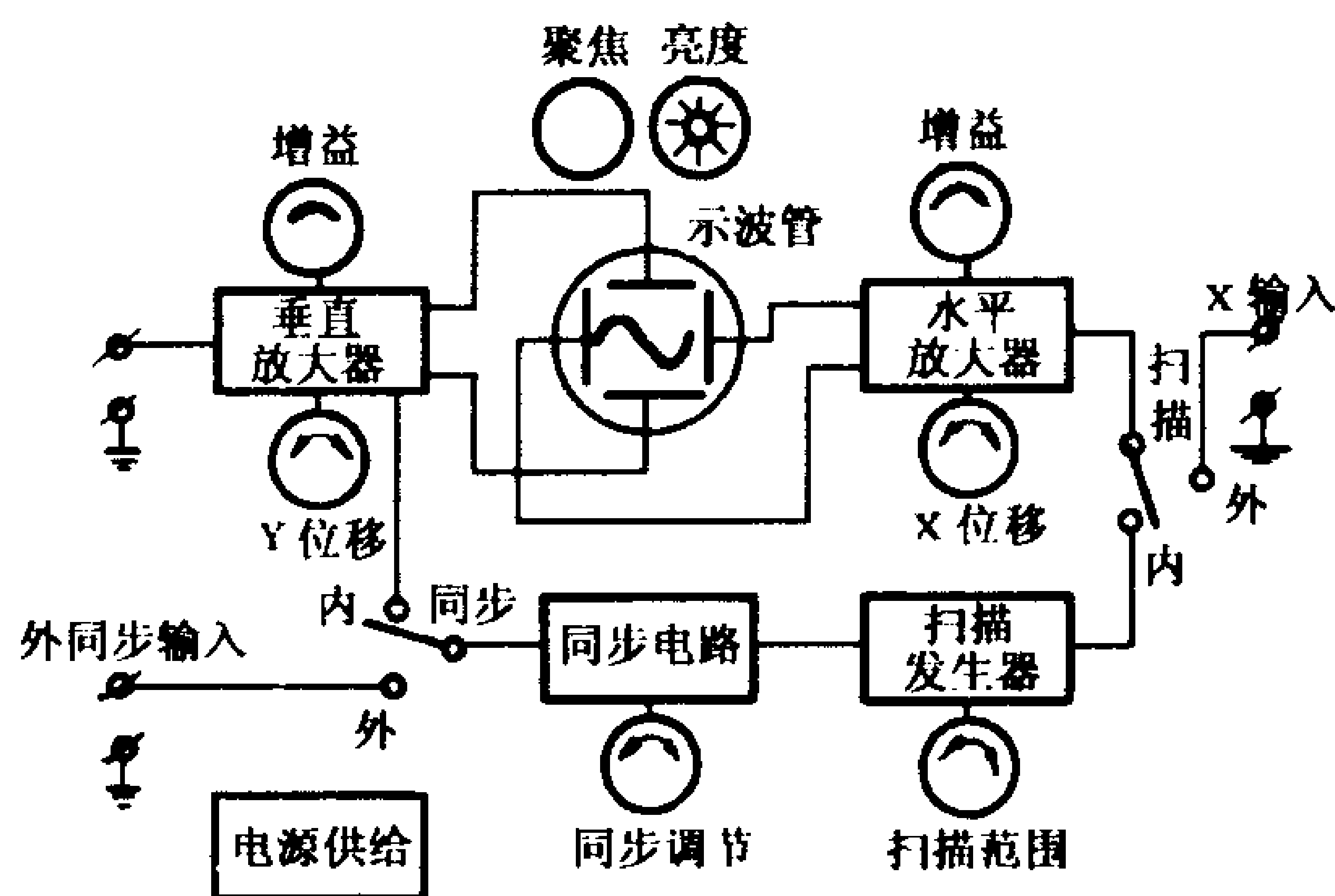


图 20-1 示波器方框图

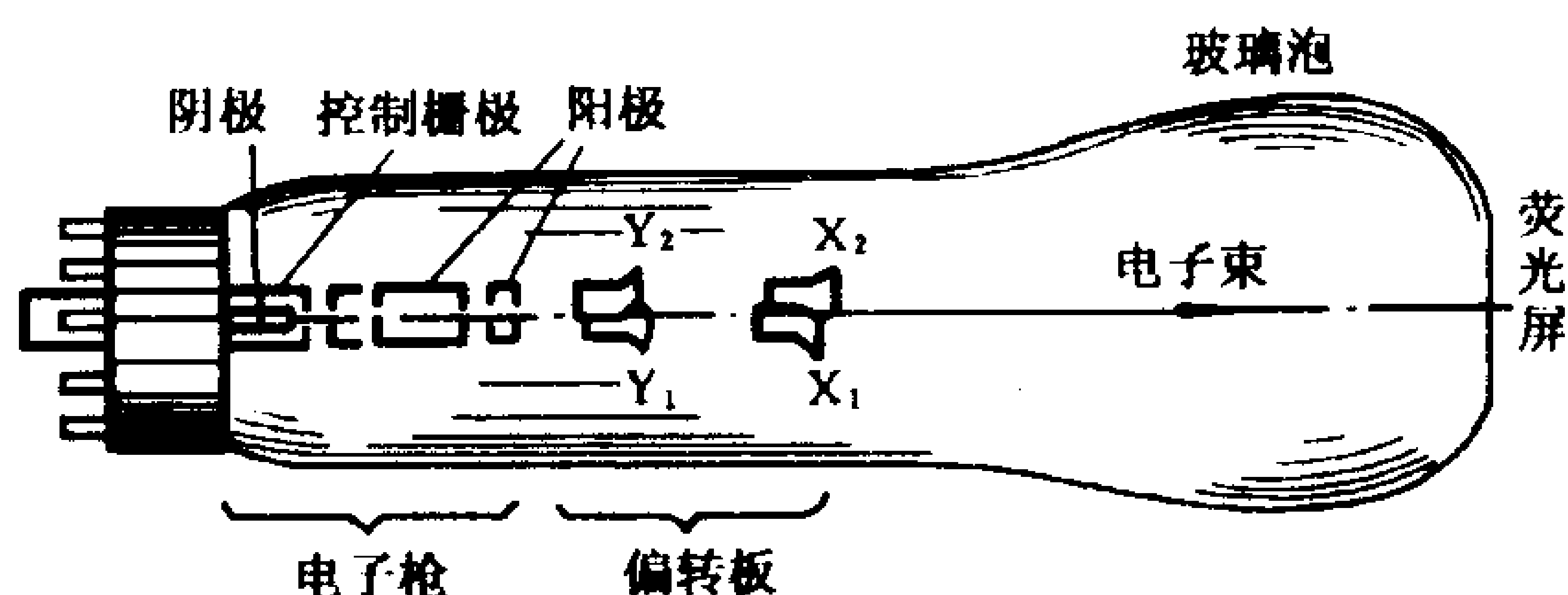


图 20-2

① 电子枪 用以产生定向运动的高速电子，电子枪包括三个电极：

热阴极——这是一个罩在灯丝外面的小金属圆筒，其前端涂有氧化物，当灯丝中通入电流时，阴极受热而发射电子，并形成电子流.

控制栅极——这是前端开有小孔的金属圆筒，套在阴极外侧，电子可以从小孔中通过. 在工作时栅极电势低于阴极，即调节栅极电势的高低可以控制到达荧光屏的电子流强度，使屏上光点的亮度（辉度）发生变化，此即“辉度调节”.

阳极——这也是由开有小孔的圆筒组成，阳极电压（对阴极）

约 1000 V,可使电子流获得很高的速度,而且阳极区的不均匀电场还能将由栅极过来的散开的电子流聚焦成一窄细的电子束,改变阳极电压可以调节电子束的聚焦程度,即荧光屏上光点的大小,称为"聚焦调节".

② 偏转极　图 20-2 中的 X_1X_2、Y_1Y_2 为两对互相垂直的极板,X_1X_2 为水平偏转板,Y_1Y_2 为垂直偏转板. 偏转板不加电压时,光点在荧光屏中央,如果 X_1X_2 加直流电压(设 X_2 电势高于 X_1),则电子束穿过 X_1X_2 间时向右偏转,屏上光点向右移动;当 Y_1Y_2 加直流电压(设 Y_2 电势高于 Y_1),电子束穿过时向上偏转,屏上光点向上移动,光点移动的距离和所加电压的高低成正比(图 20-3).

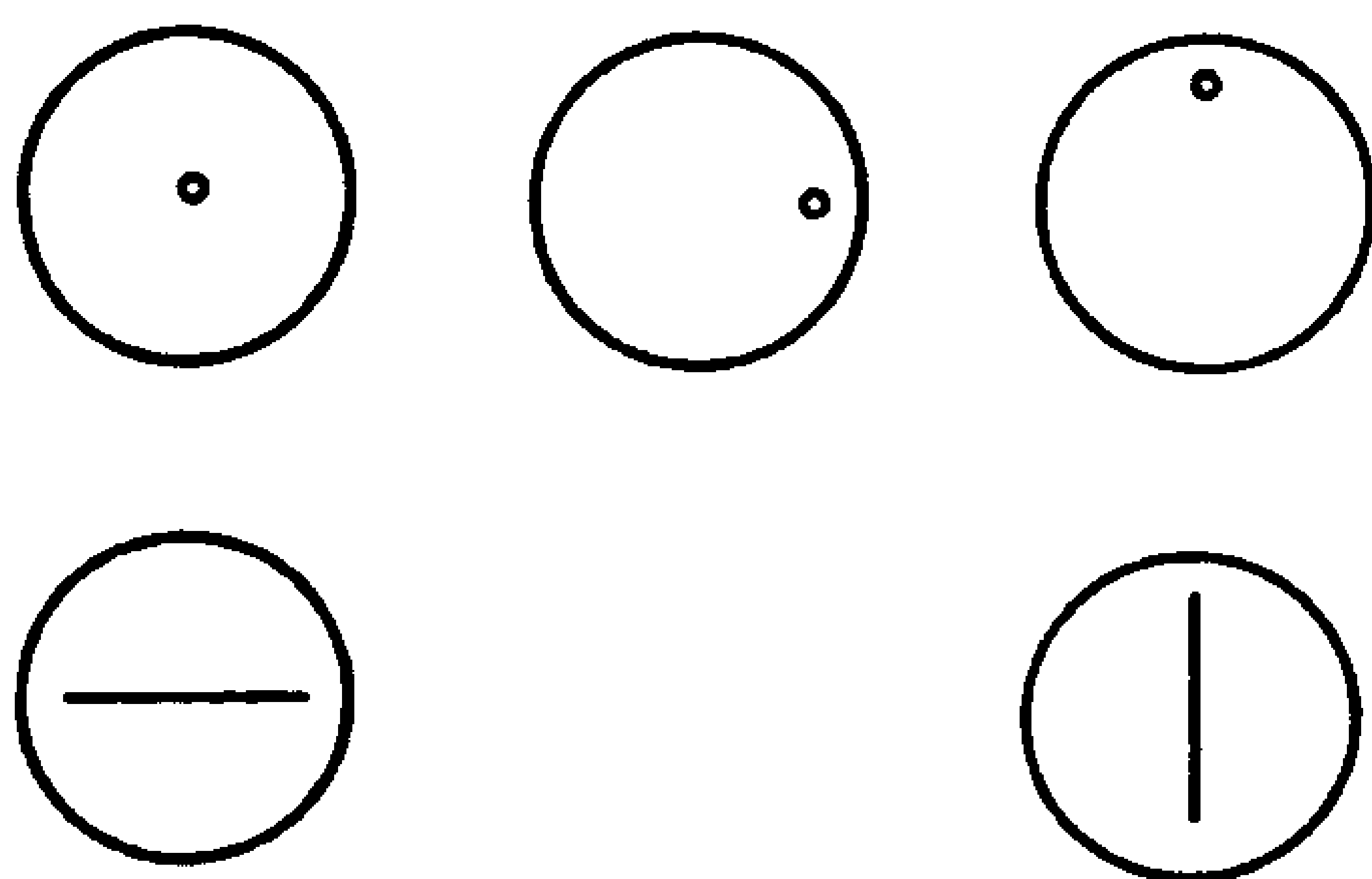


图 20-3

又当偏转板上加交变电压时,电子束穿过时将上下(或左右)摆动,屏上光点则出现振动. 由于屏上荧光余辉和人眼的视觉残留,当振动较快时,我们看到屏上出现一亮线,亮线的长度则和交变电压的峰-峰值成正比.

③ 荧光屏　阴极射线管的前端的内表面涂有发光物质,高速运动的电子打在其上,其动能被发光物质吸收而发光,在电子轰击停止后,发光仍维持一段时间,称为余辉,余辉时间的长短和发光

物质的成分有关. 荧光屏不仅能将电子的动能转换成光能,同时还转换成热能. 因此荧光屏上的光点长时间停在固定位置,可能将该处的发光物质烧毁,成为一暗斑,所以在操作时要注意不要使光点长时间停留在一处.

2. 扫描发生器

将 $U=f(t)$的交流电压信号加到Y偏转板上,X偏转板由示波器内部加上扫描电压,荧光屏上将显示一波形图,图20－4为一例. 实际上这波形图正是 $f(t)$函数曲线的一部分. 在说明屏上图线形成的原理之前,回忆一个中学的实验.

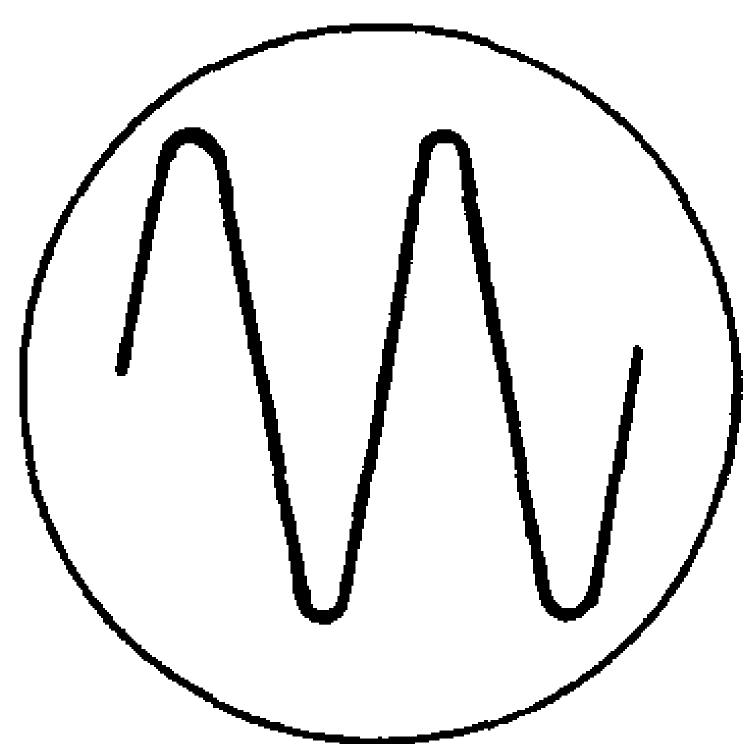


图 20－4

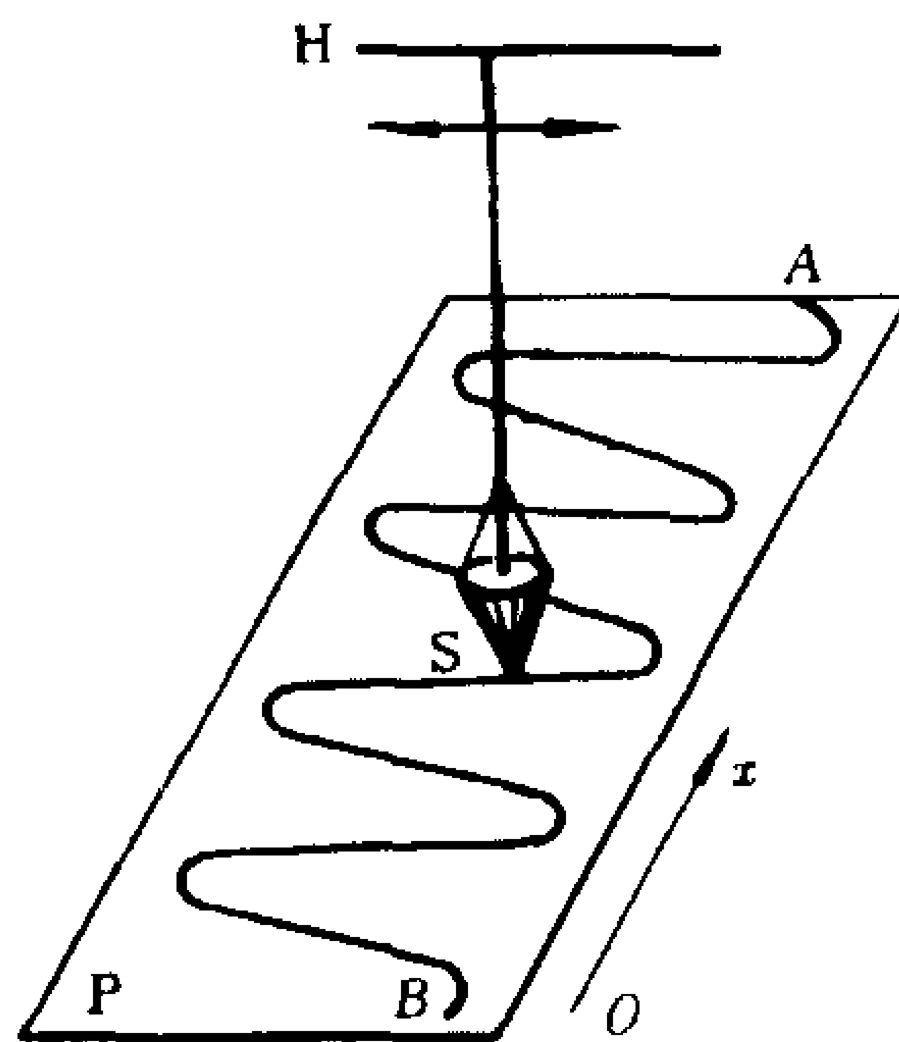


图 20－5 沙斗实验

在中学物理课中,我们曾经做过演示振动图形的沙斗实验,它的装置如图20－5所示. 图中P为硬纸板,能在 x 方向上作匀速直线运动. S为沙斗,斗内装上细土沙,细沙能从斗的下端慢慢漏出,沙斗通过细绳连结在支架的H处,构成单摆. 假定此单摆在与 x 的垂直方向 y 上振动,P在 x 方向匀速运动,那么在硬纸板上将有漏沙的径迹,这就是单摆的振动图线,它是一条正弦曲线. 根据曲线和匀速运动的速率 v 不难求得振动周期(或频率)和振幅等物理量的大小.

示波器屏上图线形成的原理和沙斗实验中纸板上漏沙径迹的道理相同. 在示波器的 X 偏转板上,加上和时间成正比变化的锯

齿形电压信号(图 20－6). 开始 X_1X_2 间电压为 $-E$,屏上光点被推到最左侧,以后 X_1X_2 间的电压匀速增加(类似于沙斗实验中匀速推动纸板),屏上光点在沿 Y 轴振动的同时,匀速向右移动,留下了亮的图线——亮点的径迹(相当于纸板上的沙的径迹),当 X_1X_2 间的电压达最大值 $+E$ 时,亮点移到最右侧,与此同时 X_1X_2 间电压迅速降到 $-E$,又将亮点移到最左侧,再重复上述过程.

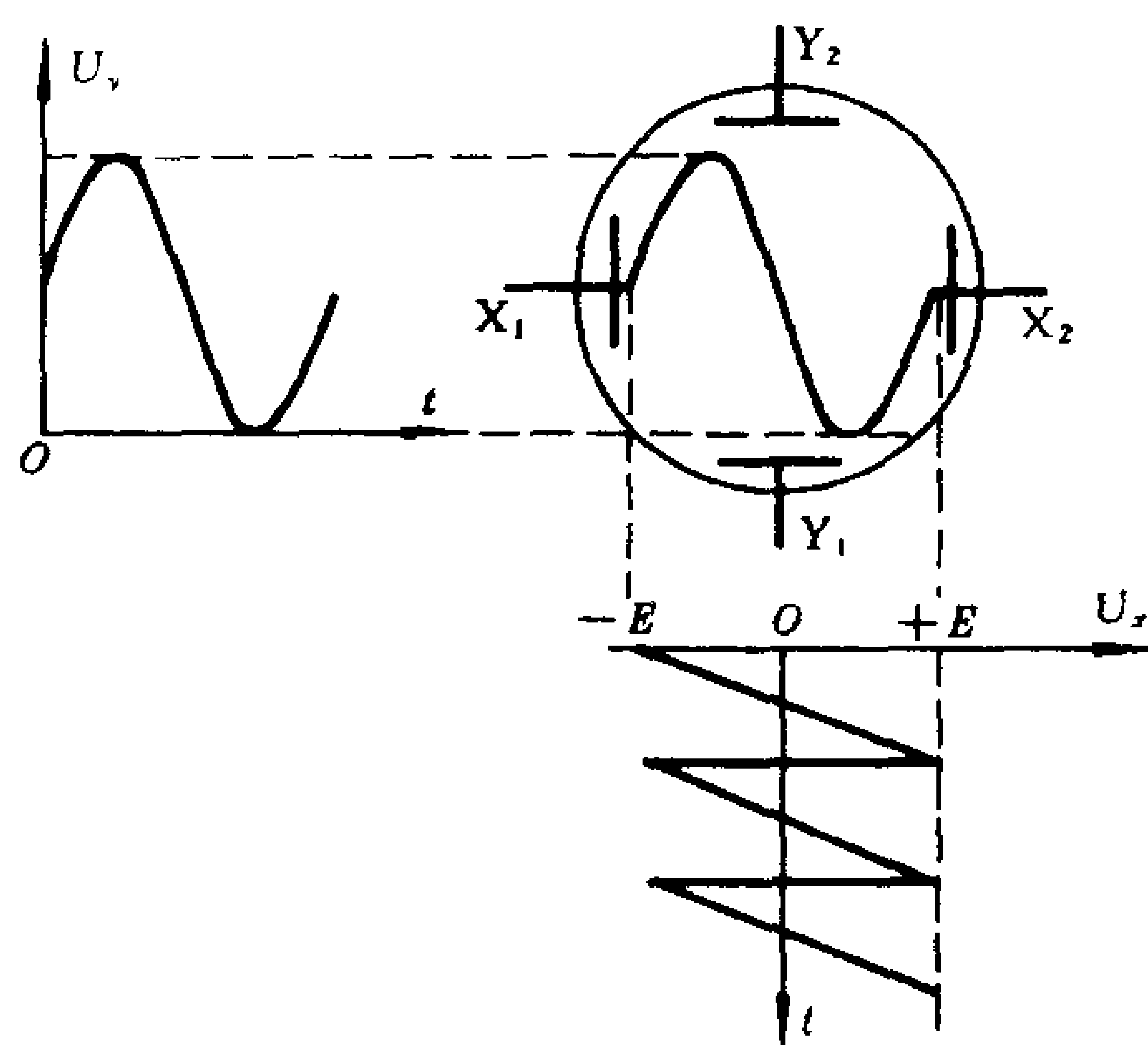


图 20－6

将加到 Y 偏转板上的电压信号,在屏上展开成为函数曲线图形的过程称为扫描,所加的锯齿形电压称为扫描电压,示波器由扫描发生器提供扫描电压.

3. 同步电路

为了观察到稳定的波形,要求每次扫描起点的相位应等于前次扫描终点的相位,或简单讲,要求扫描电压周期 T_x 为被测电压周期 T_y 的 n 倍($n=1、2、3、\cdots$),同步电路就是为了实现以上目的而设计的.

4. 水平轴与垂直轴放大器

为了观察电压幅度不同的电信号波形,示波器内设有衰减器

和放大器，对观察的小信号放大，大信号衰减，因此能在荧光屏上显示出适中的波形．通常示波器的垂直输入信号峰－峰值[1]应不低于 10～50 mV，因为输入信号的电压太小，一不能同步，二在荧光屏上呈一条横线失去示波的功能；也不要将几百伏甚至上千伏的信号直接输入到示波器，最好用分压器取得几伏左右的分压再用示波器观察波形．此外，还有水平和垂直两个方向的位移调节旋钮，用来改变和选择波形的位置．

5．电源供给保障了示波器各部件的正常工作

二、示波器的应用

示波器能够正确地显示各种波形的特性，因而可用来监视各种信号及跟踪其变化规律．利用示波器还可将待测的波形与已知的波形进行比较，粗略地测量波形的幅度、频率和相位等各种参量．

随着计算机的发展，示波器的结构发生了很大变化，主要有：(1)显示波形的示波管改为数字点阵的液晶显示屏，因而线性度好，并且可显示有关参数字符；(2)测试的波形成为数据存在机内存贮器中，需要显示时，可对采集的数据进行平均，求峰值等项处理后再显示出来；(3)示波器调试更方便，测到的数据可与上位机联结，进行数据传送作进一步处理．因此示波器的变化会使实验室的测量精确度显著提高．此类示波器的价格当前较高．

1．观察波形

示波器的种类很多，性能上差异也较大，以下的讨论均以通用示波器 SB－10 为准进行，在操作上和实验室提供的仪器可能不同，但基本思想是相同的．

使用示波器前将各旋钮放在左右可调的中间位置，然后接通电源，预热一分钟；

[1] 峰－峰值指电压最大值与最小值之差，常用 p－p 表示．

将待测信号接到“Y 输入”,“X 轴衰减”接“扫描”,“整步选择”接“内 +”或“内 -”,即内部同步. 这样,在荧光屏上就能出现无规则的不稳定的波形;

调节“Y 轴增幅”和“Y 轴衰减”以及“Y 轴移位”;调节“X 轴移位”和“扫描范围”,使得波形大小和位置适中,并出现 2 至 3 个完整波形,如图 20 - 7 所示. 此时,波形可能“走动”;调节“整步调节”和“扫描微调”就能使波形稳定下来.

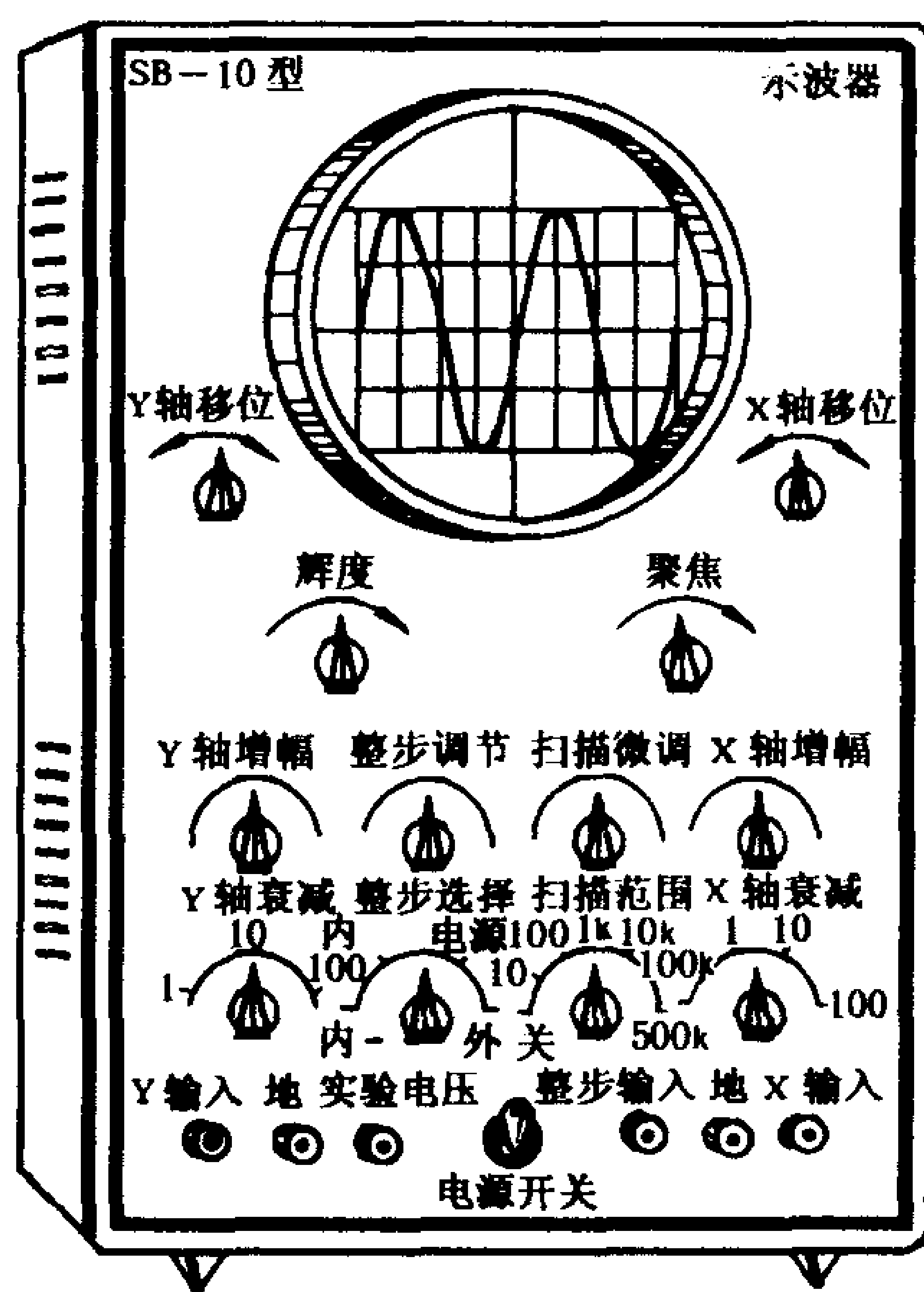


图 20 - 7　用 SB - 10 型示波器观察波形

以上是粗调示波器的几个重要步骤. 为了使显示的波形清晰、稳定和幅度适中,再重新仔细调节示波器各旋钮,边调边观察,反复练习后就能比较熟练地掌握用示波器观察待测信号波形的方法.

2. 电压测量

用示波器不仅能测量直流电压,还能测量交流电压和非正弦

波的电压. 它采用比较测量的方法,即用已知电压幅度波形将示波器的垂直方向分度,然后将信号电压输入,进行比较,如图 20-8 所示. 图中的方波幅度假定为 10 V,占据了四个分度,因此每分度表示 2.5 V 即 2.5 V·div^{-1}. 如果待测的正弦波其峰-峰值(U_{p-p})为 2.0 div,则峰-峰电压 U_{p-p} = 5.0 V,所以其有效值按公式$\left(U=\frac{0.71\times U_{p-p}}{2}\right)$就可计算出来. 如果将待测信号衰减至1/10,显然 U_{p-p}值只有 0.5 V,测量精度降低了;如果放大至 10 倍就不可能量到它的峰-峰值. 如果待测信号较大,衰减至 1/10 后,显示的波形还占了三个分度,则待测信号的峰-峰值

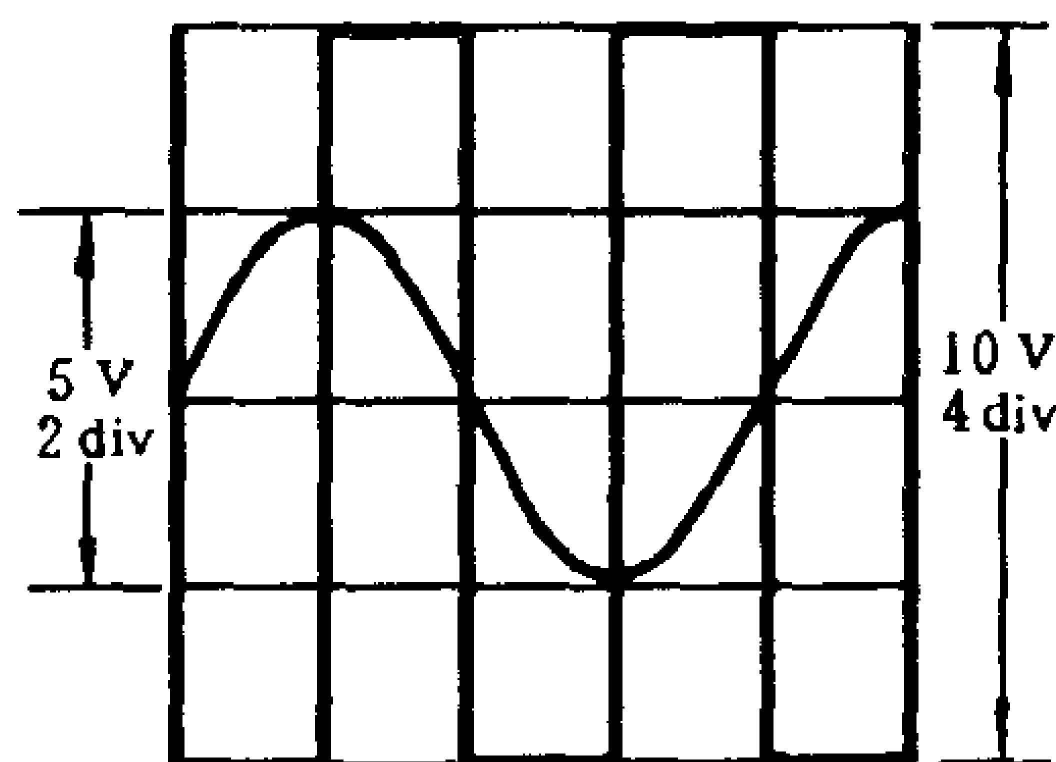


图 20-8 幅度比较

$$U_{p-p} = 2.5\ \text{V/div} \times 10 \times 3.0\ \text{div} = 75\ \text{V}$$

注意:在测量电压幅度时不能调节"增益"旋钮,因为用已知电压分度时,通过"增益"调节 Y 轴的放大倍数已经确定,即灵敏度已定,若再调节"增益"旋钮时,灵敏度就会发生变化,以致计算出来的幅度不正确,因此测量时只能改变衰减的倍数,不能调节"增益"旋钮. 通常示波器的最高灵敏度为 10 mV·div^{-1}.

3. 测量频率或周期

用示波器测量频率或周期必须知道 X 轴的扫描速率,即 X 方向每分度相当于多少秒或者微秒. 假定图 20-8 所示的 X 扫描速率为 10 ms·div^{-1},则方波的周期 2.0 div 相当于 20 ms,而正弦波的周期为

$$4.0\ \text{div} \times 10\ \text{ms} \cdot \text{div}^{-1} = 40\ \text{ms}$$

因此频率 $f=\frac{1}{40\ \text{ms}}=25$ Hz 就可计算出来. 注意:当显示波形的

个数较多时，周期可根据测量几个周期的时间除以 n 来计算，以保证周期有较高的精度.

因为稳定的标准频率容易得到，示波器判别合成的波形（利萨如图形）非常直观、灵敏和准确，所以测频率时都要用到它，在复杂信号的频谱分析中也要用到它. 测量线路如图 20－9，图中待测频率 f_Y 接在 Y 输入端，已知频率 f_X 的信号作为标准正弦信号接在 X 输入端，"X 轴衰减"可拨在"1"或"10"或"100"位置，见图 20－7. 如果出现如图20－10所示的波形，则 $f_Y = nf_X$，① $f_Y = f_X$、

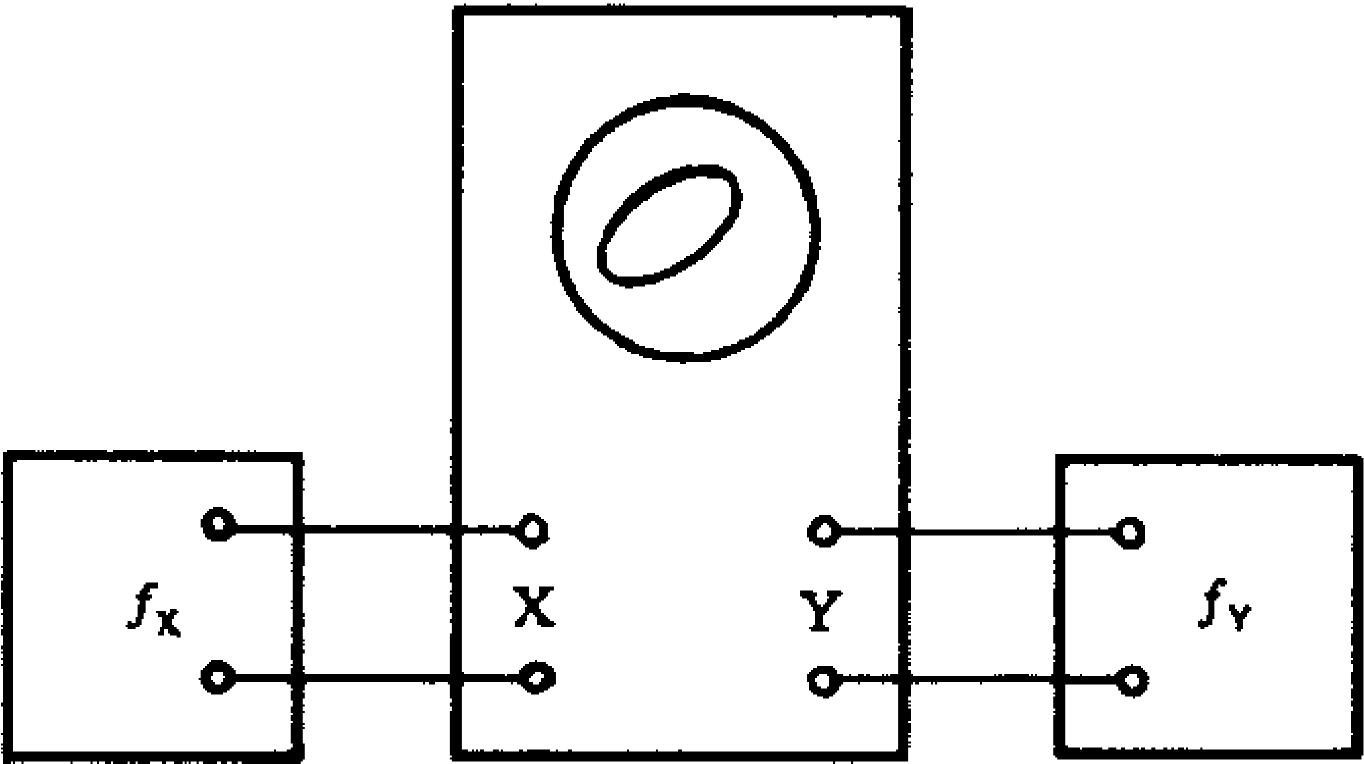


图 20－9　利萨如图形的观察

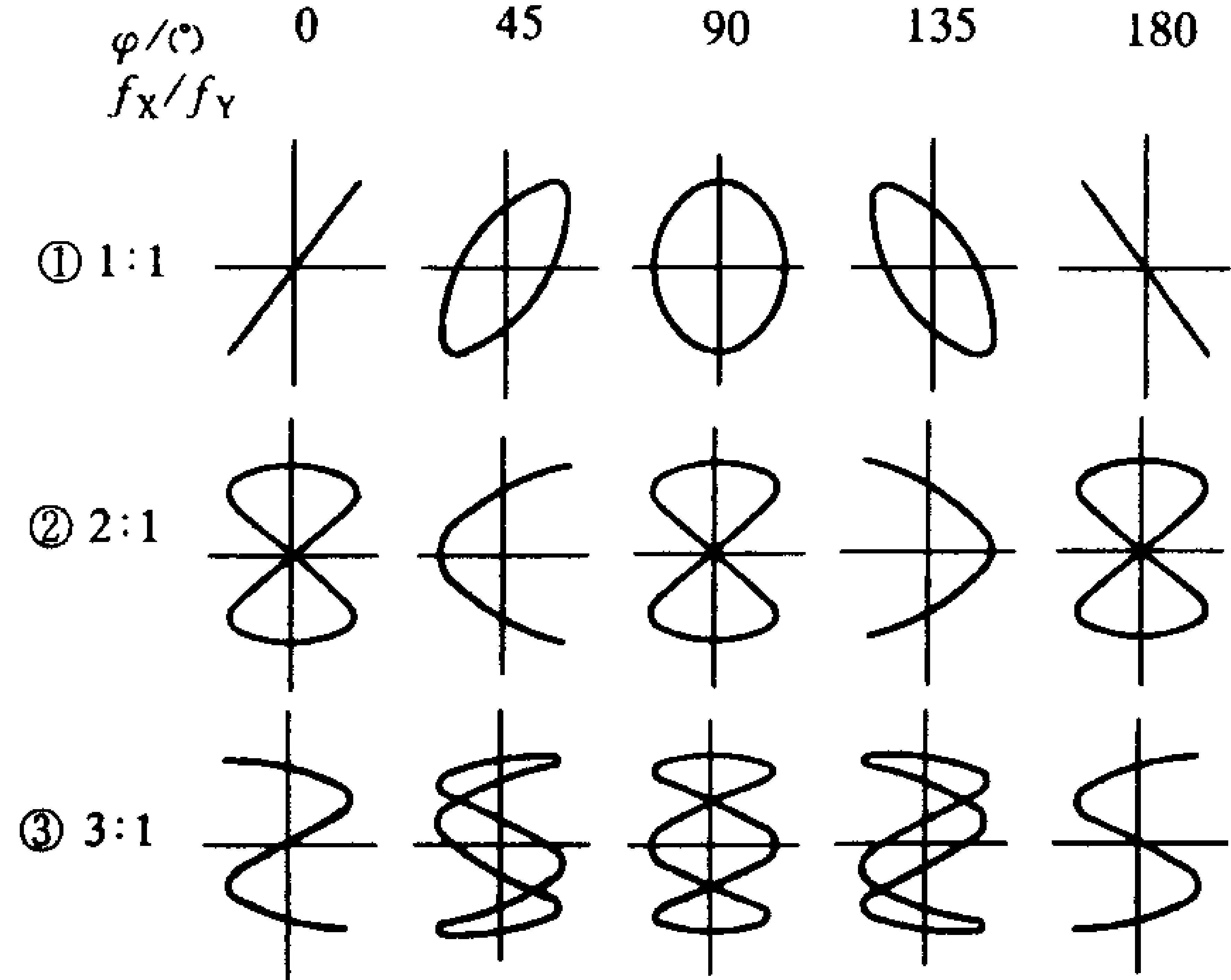


图 20－10　几种相位和频比的利萨如图形

②$f_Y=\frac{1}{2}f_X$、③$f_Y=\frac{1}{3}f_X$. 从利萨如图形在 X 轴和 Y 轴上的切点数,可知比值 f_Y/f_X,一般的计算公式为

$$\frac{f_Y}{f_X}=\frac{\text{与 X 轴切点数}}{\text{与 Y 轴切点数}} \tag{20-1}$$

注意:由于两种信号的频率不会非常稳定和严格相等. 因此得到的利萨如图形不很稳定,经常会出现上下左右来回地或定向地滚动现象. 如果是比较稳定的翻转,则测出翻转一次的时间为 t(s),可知 f_X 与 f_Y 之差为 $1/t$(Hz).

4. 测量两个正弦信号的相位差

根据利萨如图形可以计算出相位差,见图 20－11 所示的图形.

令 $$y=a\sin\omega t \tag{20-2}$$

$$x=b\sin(\omega t+\varphi) \tag{20-3}$$

则 y 与 x 的相位差为 φ. 假定波形在 X 轴线上的截距为 $2x_0$,则对 X 轴上的 P 点

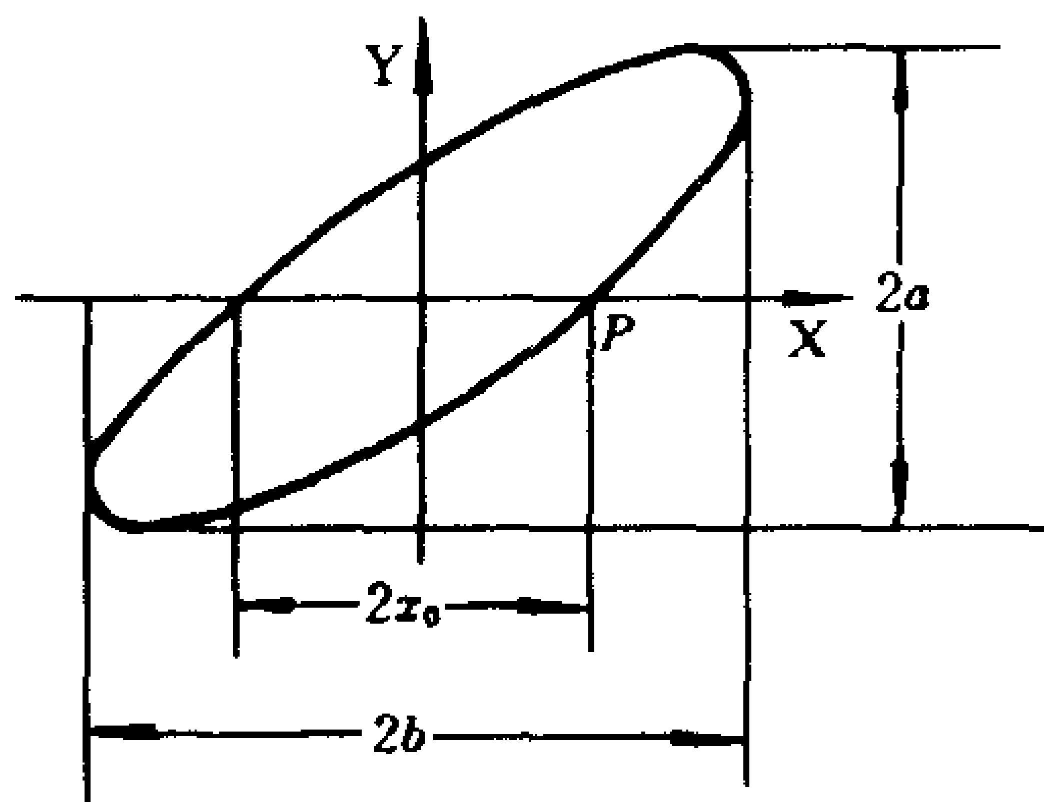


图 20－11　相位差的计算

$$y=a\sin\omega t=0$$

因而 $$\omega t=0,$$

所以 $$x_0=b\sin(\omega t+\varphi)=b\sin\varphi$$

则 $$\varphi=\arcsin\frac{x_0}{b} \text{ 和 } \pi-\arcsin\frac{x_0}{b} \tag{20-4}$$

实验内容

1. 观察波形. 调节音频信号发生器的输出幅度,用(晶体管)毫伏表测量它的幅度有效值,使它等于 1.00 V,然后用示波器观察它的波形.

2. 用“比较信号”[①]对 Y 轴分度,记下示波器使用的灵敏度

① 一般较高级的示波器都有“比较信号”,也可用 3.0 V 直流电压作为比较信号.

$S(\mathrm{V}\cdot\mathrm{div}^{-1})$,然后测量上述波形的峰－峰值,将其换算到有效值,与 1.00 V 比较是否符合.

3. 用“扫描速率”测量上述波形的周期,然后换算到频率,试与频率计的读数进行比较.

4. 用利萨如图形测量上述波形的频率.

5. 用利萨如图形测量移相器的相位差.

移相器的构造如图 20－12 所示,调节可变电阻 R_2 可改变 U_{OA} 与 U_{OD} 的相位差 φ 值,但是不改变 U_{OA} 与 U_{OD} 的幅度大小,当 $R_2=0$ 时,U_{DO} 与 U_{AO} 相差 180°;当 R_2 足够大,$U_{DO}=U_{AO}$,即 D 点顺时针转到 A 点,U_{DO} 与 U_{AO} 相位相同,因此 φ 值可取自 0 到近 180°范围①.

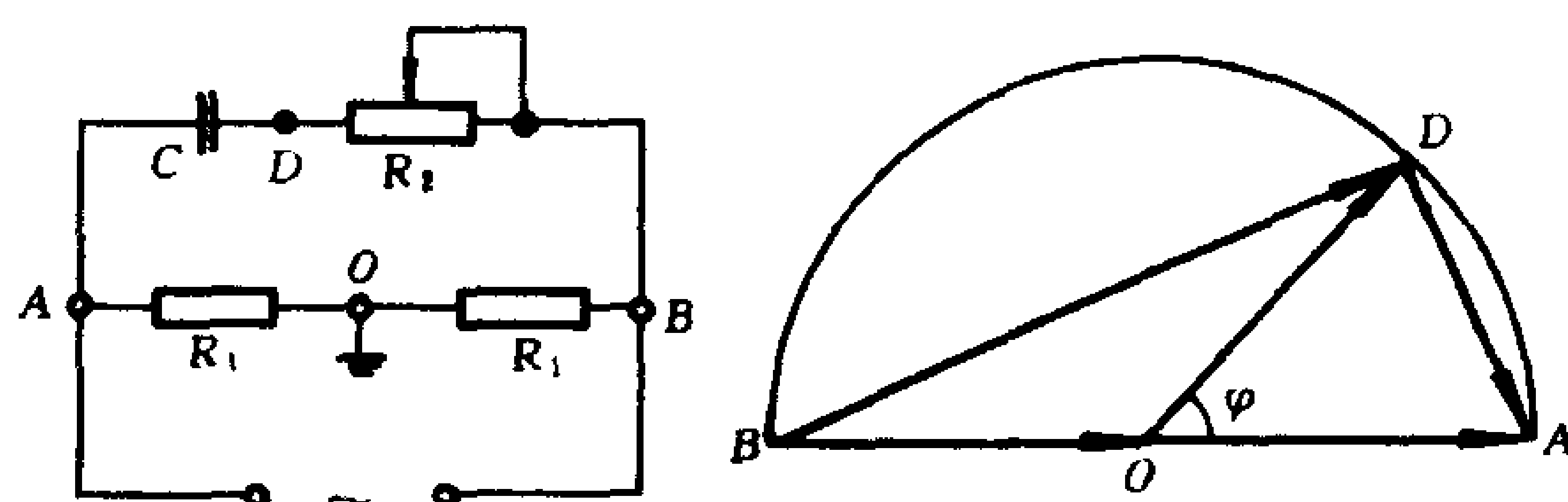


图 20－12　移相器的线路和矢量图

将示波器接地端钮与移相器 0 点相连;Y 和 X 输入端分别与 A 和 D 点相连,适当调节 Y 和 X 的增益和衰减旋钮,就可看到稳定的利萨如图形. 根据(20－4)式计算三种不同的相位差.

预习思考题

1. 在演示的沙斗实验中,如果纸板 P 在 x 方向上不是匀速运动,那么振动图线是怎样的?

2. 沙斗实验与示波器工作原理有什么相似之处?

---

① 关于图 20－12 移相器的原理可参阅附记.

3. 最简单的示波器包括哪几个部分?

4. 扫描发生器的输出波形是什么形状?为什么?如果用 50 Hz 的交流信号作为扫描波,那么正弦电压信号在示波管荧光屏上将显示出怎样的波形?

5. 同步电路的作用是什么?"内"和"外"同步的作用是什么?

6. 示波器的水平轴和垂直轴设有放大器为何还要衰减器?

7. 示波器的主要功能是什么?

8. 观察波形的几个重要步骤是什么?

9. 怎样用示波器测量待测信号的峰-峰值?

10. 怎样用示波器测量振荡波形的周期?

11. 怎样用示波器的利萨如图形法测量正弦波的频率?

12. 怎样根据利萨如图形来计算二个正弦信号的相位差?

复习思考题

1. 简要写出示波器面板上各旋钮的作用.

2. 示波器能否精确测量电压、周期、频率和相位差?为什么?示波器的真正功能是什么?

3. 图 20-13 显示的几种波形说明调节中存在什么问题?

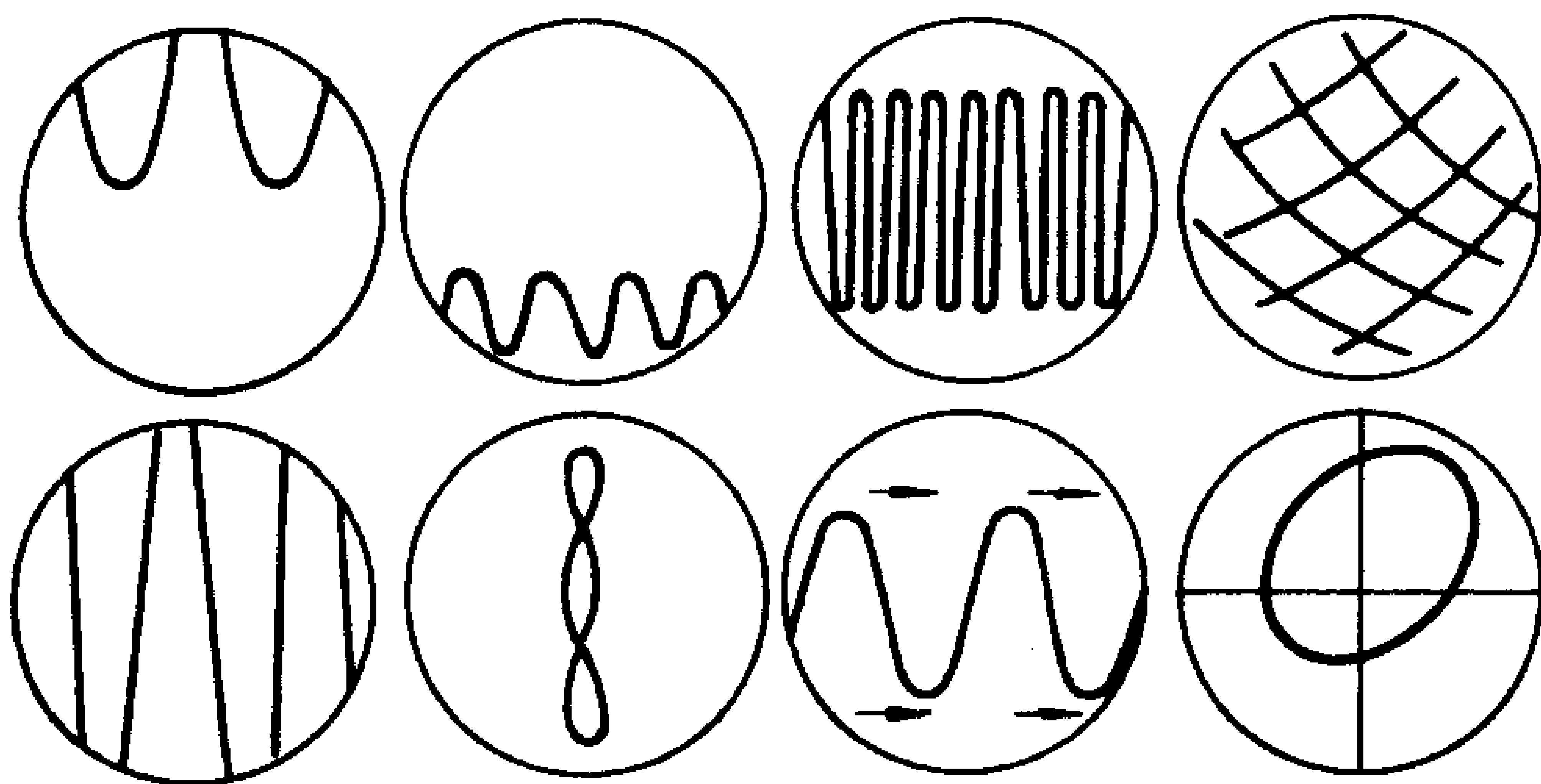


图 20-13　几种未调好的波形

[附记]

RC 移相器的原理

根据图 20 - 12 所示，输入信号用$\overrightarrow{BA}$表示，则在两只 R_1 串联的电路中有关系式

$$\overrightarrow{BO}+\overrightarrow{OA}=\overrightarrow{BA}$$

在 R_2 与 C 串联电路中有关系式

$$\overrightarrow{BD}+\overrightarrow{DA}=\overrightarrow{BA}$$

由于 U_C 落后于 U_R，相角差为 $\pi/2$，因此$\overrightarrow{BD}\perp\overrightarrow{DA}$. 如果以$\overline{BA}$为直径作圆，那么 D 点必定落在圆周上. 若可变电阻 R_2 变值时，只要维持$\overrightarrow{AB}$大小不变，则不论$\overrightarrow{BD}$和$\overrightarrow{DA}$如何变更，D 点始终在圆周上，仅位置不同而已，当 $R_2=0$ 时，$\overline{BD}=0$，D 点与 B 点重合；当 $R_2\gg\dfrac{1}{C\omega}$时，$\overline{BD}\gg\overline{DA}$，$D$ 点与 A 点重合. 如果 O 点接地作为参考点，则 A、B 和 D 相对于 O 点的电势变化，可从$\overrightarrow{OA}$、$\overrightarrow{OB}$和$\overrightarrow{OC}$矢量的关系看出. 为了叙述方便，令$\angle DOA=\varphi$，则 φ 角表示$\overrightarrow{OD}$与$\overrightarrow{OA}$的相角差，当 D 点由 B 点沿着圆周转到 A 点时，φ 由 180° 变到 0°，但是$\overline{OD}$值不变. 因此用示波器观察$\overrightarrow{OD}$与$\overrightarrow{OA}$两个输出信号时，改变 R_2 值，就可改变它们间的相位差.

实验二十一　铁磁物质动态磁滞回线的测试

目的

1. 了解用示波法测铁磁物质动态磁滞回线的基本原理；
2. 进一步了解磁性材料的特性.

仪器和用具

音频信号发生器、示波器、MF－20 型万用表、标准互感器、电阻、电容.

原理

1. 磁滞回线

磁滞是铁磁物质在磁化和去磁过程中，它的磁感应强度不仅依赖于外磁场强度，而且还依赖于它的原先磁化程度的现象. 用图形表示铁磁物质磁滞现象的曲线称为磁滞回线，它可通过实验测得，如图 21－1 所示.

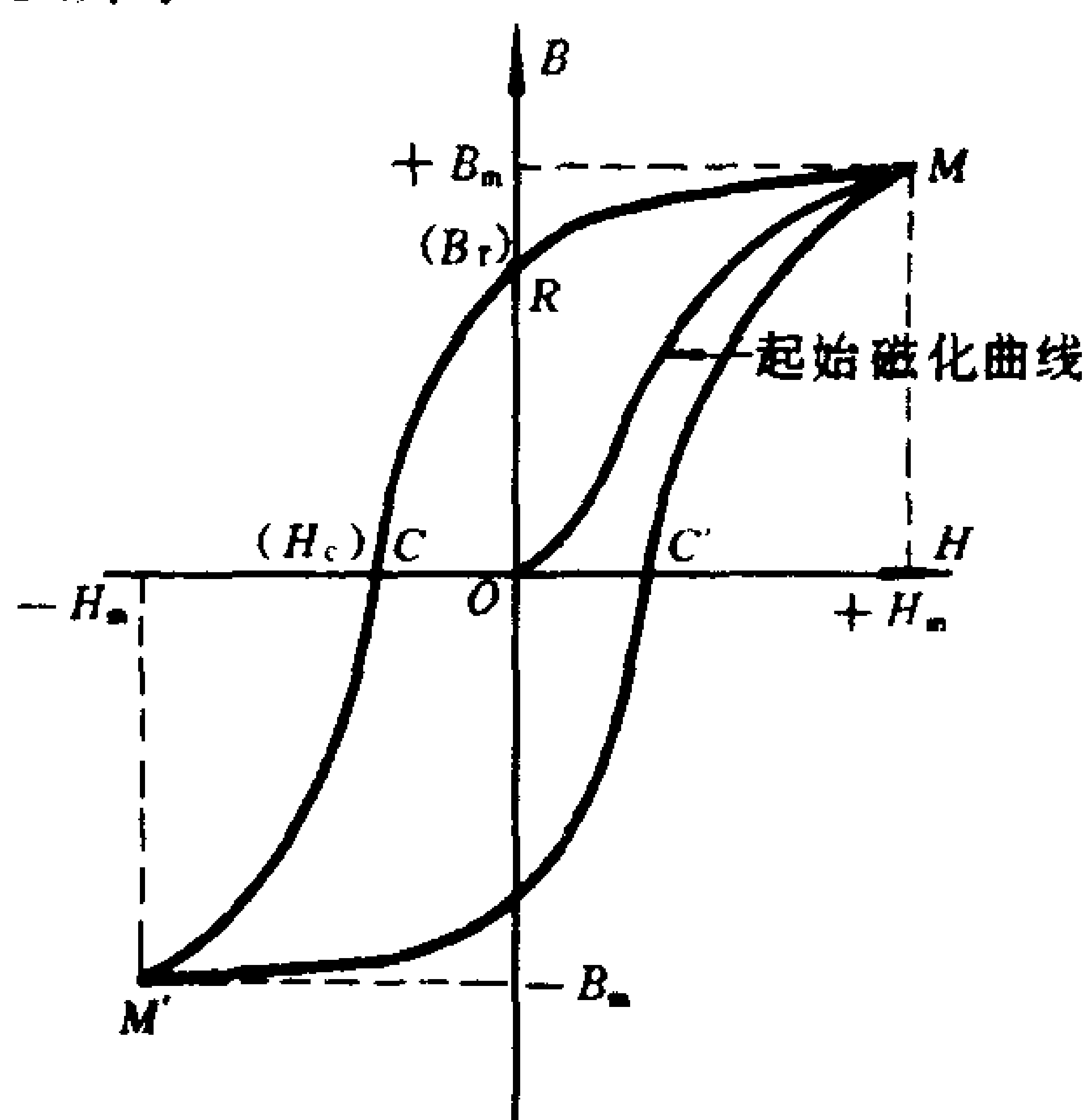
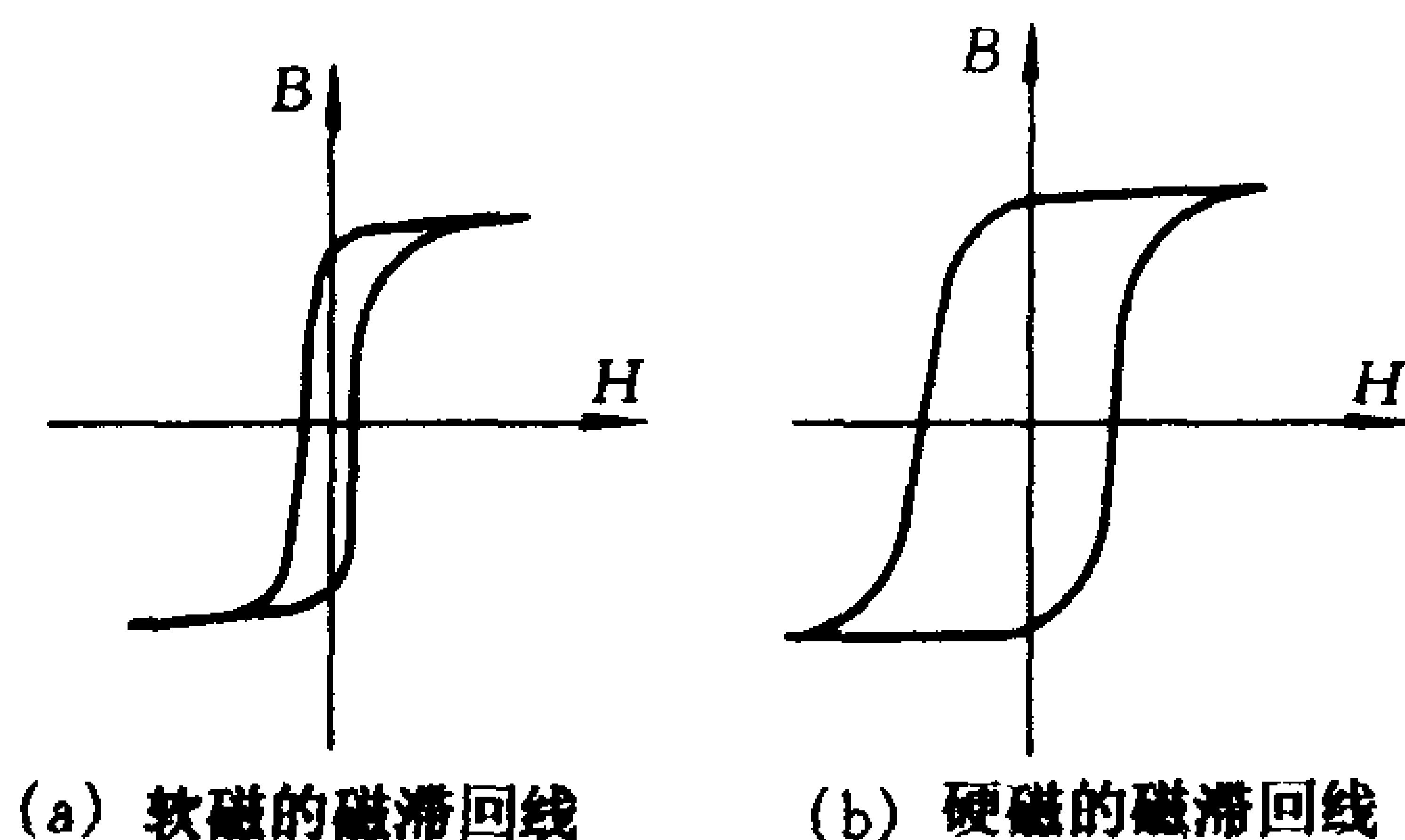


图 21－1　磁滞回线图

当磁化场 H 逐渐增加时，磁感应强度 B 将沿 OM 增加，OM 称为起始磁化曲线，如果将磁化场 H 减小，B 并不沿原来的曲线减小，而是沿 MR 曲线下降，即使磁化场 H 为零时，它仍保留一定的 B_r（如图中 R 点），OR 表示当磁场为零时的磁感应强度，称为剩余磁感应强度. 当反向磁化场达到某一值，磁感应强度变为零时，所必须加的外磁场 H_c，称为矫顽力. 当反向场继续增加，反向磁感应强度很快达到饱和（如图中 M' 点），最后逐渐减小反向磁场时，磁感应强度又逐渐变大，这样多次重复改变磁化场强度，磁感应强度 B 将形成一闭合曲线，即磁滞回线，由于铁磁物质处在周期性交变磁场中，铁磁物质周期地被磁化，相应的磁滞回线称为交流磁滞回线，它最能反映在交变磁场作用下样品内部的磁状态变化过程. 磁滞回线所包围的面积表示在铁磁物质通过一磁化循环中所消耗的能量，叫做磁滞损耗，在交流电器中必须尽量减小磁滞损耗. 从铁磁物质的性质和使用方面来说，它主要按矫顽力的大小分为软磁材料和硬磁材料两大类. 软磁材料矫顽力小，这意味着磁滞回线狭长，它所包围的"面积"小，从而在交变磁场中磁滞损耗小，因此适用于电子设备中的各种电感元件、变压器、镇流器中的铁芯等. 硬磁材料的特点是矫顽力大，剩磁 B_r 也大，这种材料的磁滞回线"肥胖"，磁滞特性非常显著，制成永久磁铁应用于各种电表、扬声器、录音机等. 软磁与硬磁材料的磁滞回线如图 21－2所示.



(a) 软磁的磁滞回线　　(b) 硬磁的磁滞回线

图 21－2

2. H、B 值的获得

用示波法测量磁滞回线必须使示波器的水平(X 轴)输入电压正比于被测样品中的 H,使垂直(Y 轴)输入电压正比于样品中的 B,并保持 $B(H)$为样品中的原有函数关系,这样才能在示波器的荧光屏上如实地显示出样品的磁滞回线. 电路如图 21-3 所示.

图中 N_1、N_2 为螺绕环的原线圈与次级线圈的匝数,R_1、R_2 为电阻,C 为电容.

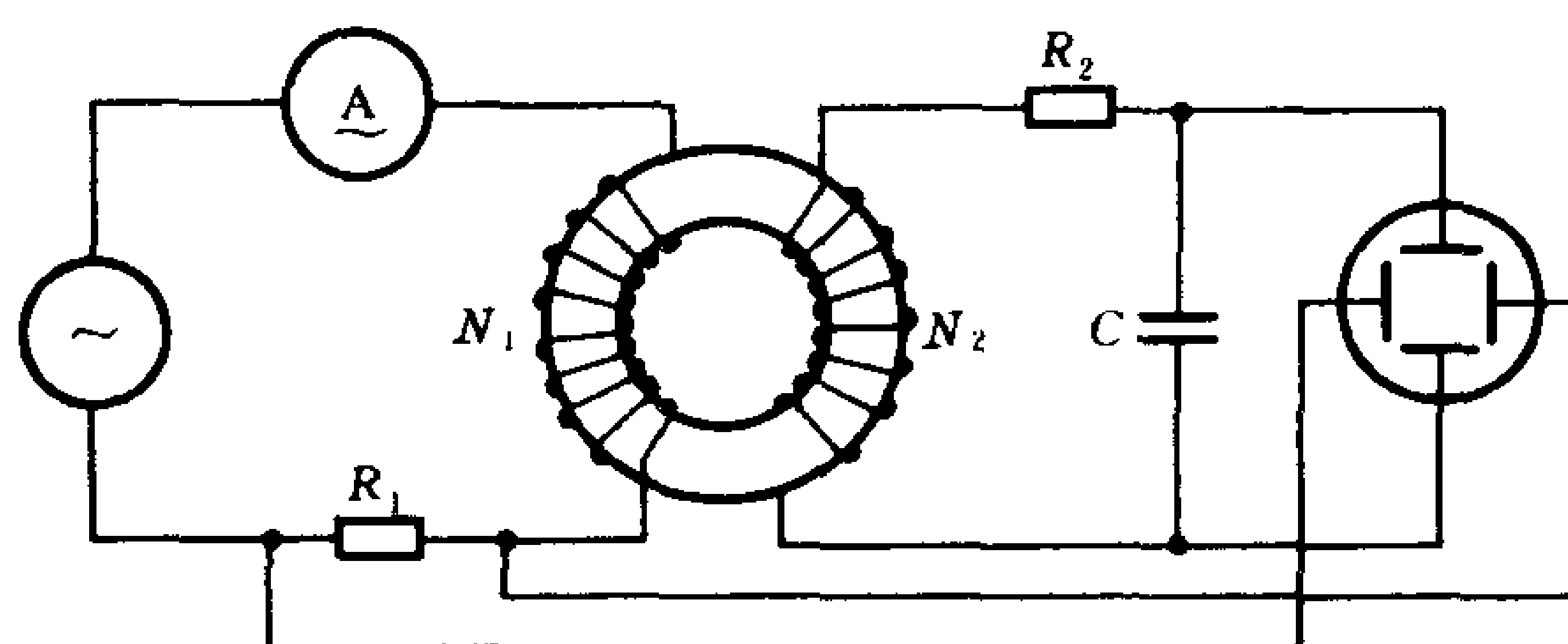


图 21-3 用示波法测量磁滞回线电路图

(1) 电压 U_{R_1} 正比于 H 的证明

当原线圈输入交流电压 $U_{入}$ 时,就产生交变的磁化电流 i_1,根据安培环路定律其磁场强度 H 可用下式表示:

$$H = \frac{N_1}{l} i_1 \qquad (21-1)$$

式中 l 为被测样品的平均周长.

$$i_1 = \frac{U_{R_1}}{R_1}$$

所以

$$H = \frac{N_1}{R_1 l} U_{R_1} \qquad (21-2)$$

或

$$U_{R_1} = \frac{R_1 l}{N_1} H$$

式中 R_1 为磁化电路中的串联电阻,亦称取样电阻. 上式表示 U_{R_1}

与 H 成正比.

(2) 电压 U_C 正比于 B 的证明

交变的磁场强度 H 将在样品中产生交变的磁感应强度 B,假设样品的截面积为 S,穿过该截面的磁通量 $\phi = B \cdot S$,由法拉第电磁感应定律可知,在副线圈中将产生感应电动势

$$E_{感} = -N_2 \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = -N_2 S \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{21-3}$$

由上可知 $E_{感}$ 只与 $\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$ 成正比,

而
$$B = -\frac{1}{N_2 S}\int E_{感}\,\mathrm{d}t$$

因此只有对 $E_{感}$ 积分才能得到 B 值,为此我们采用如图 21-3 所示的积分电路,图中 R_2 和电容 C 构成了 R_2C 积分电路,由图可知次级回路方程式

$$E_{感} = i_2 R_2 + U_C + i_2 \cdot \omega L_2 \tag{21-4}$$

式中 i_2 为次级线圈中的电流,U_C 为电容两端的电压. 通常螺绕环的次级线圈 N_2 的电感很小,可以不计,如 R_2、C 的数值取得适当,积分电路的时间常数 R_2C 将远大于交流的周期,即 $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$,致使 U_C 相对于 U_{R_2} 可以小到不计,则(21-4)式为

$$E_{感} \approx i_2 R_2$$

回路电流 i_2 的大小主要由 R_2 决定.

又因
$$i_2 = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = C\frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t}$$

代入上式得
$$E_{感} = R_2 C \frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t} \tag{21-5}$$

由式(21-3)和式(21-5)联立得

$$-N_2 S \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = R_2 C \frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t} \tag{21-6}$$

将上式两边积分得 $$B = -\frac{R_2 C}{N_2 S} U_C \qquad (21-7)$$

上式说明电容器上的电压 U_C 与 B 成正比，故将电容两端电压作为 Y 轴的输入电压，此电压正比于样品中的 B，将 R_1 两端电压作为 X 轴的输入电压，此电压正比于样品中的 H，这样在荧光屏上显示的图形就能真实反映被测样品的磁滞回线. 加大磁化磁场使铁磁材料达到饱和，即增大磁化场时，磁滞回线的面积基本不增加，只是回线端点向外扩展而已，此时的磁滞回线称为饱和磁滞回线.

3. 示波器 X、Y 轴的定标与 H、B 的计算

为了从荧光屏上记下磁滞回线的 $\pm H_m$、$\pm B_m$、B_r 和 H_c 值，求得它们的实际值，必须对示波器的 X、Y 轴按 H、B 定标.

(1) 对示波器的 X 轴进行 H 定标

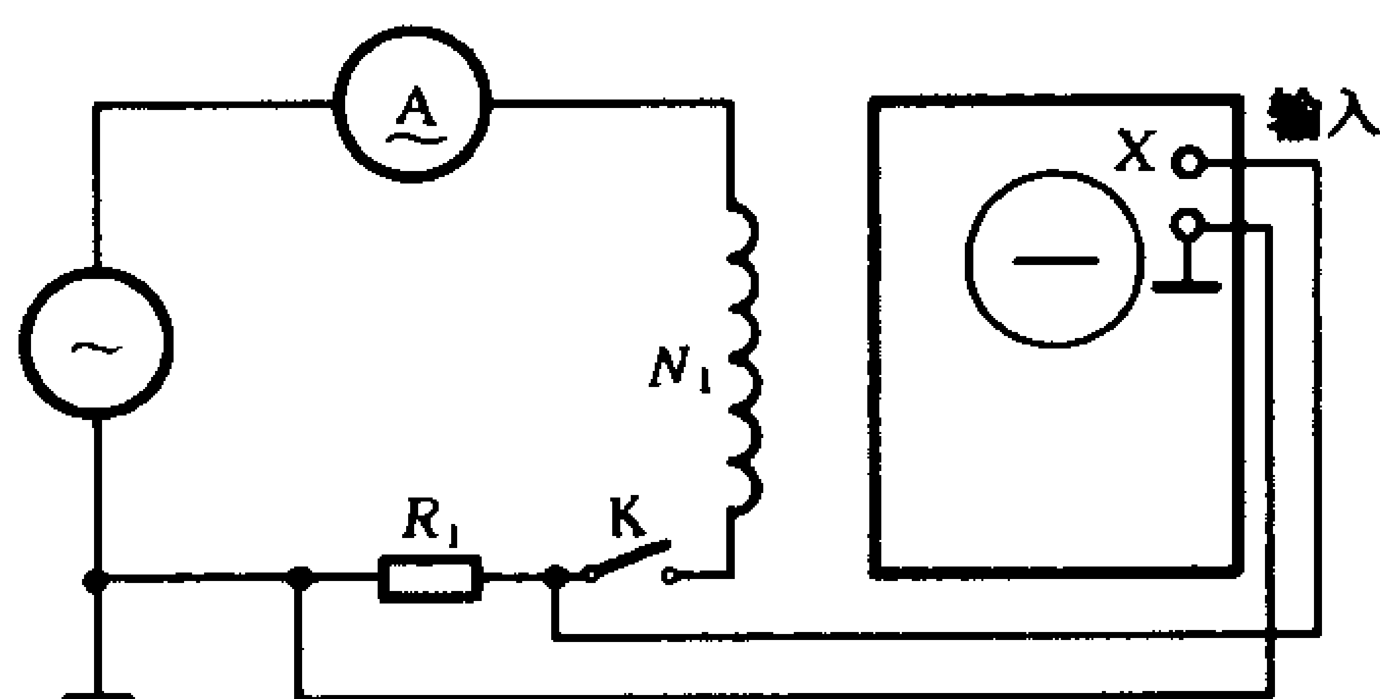


图 21－4 H 定标电路图

拆除 Y 输入端与电容的连线，并将 Y 输入端对地短路，在原线圈回路中接入电流表，在频率不变的条件下，改变音频振荡器输入电压的大小，使恰好等于磁滞回线在 X 轴上投影的光迹的长度，若电流表此时的读数为 I_1，其峰值为 $I_{1m}=\sqrt{2}I_1$，根据安培环路定律，

$$H = \frac{I_{1m}N_1}{l} = \frac{\sqrt{2}N_1 I_1}{l} \ (\mathrm{A/m})$$

式中 I_1 单位为安培，l 单位为米.

(2) 对示波器的 Y 轴进行 B 值定标

电路如图 21－5 所示．用标准互感器 M 取代被测样品，音频振荡器输出频率和 R_1、R_2、C 值均保持原来的数值，闭合开关 K．调节音频振荡器输出电压，使示波器的垂直线段等于图 21－1 中的 $-B_m$ 到 $+B_m$ 的高度，如果初级回路中电流 i_M 的指示值为有效值 I_M 安，根据法拉第电磁感应定律，次级回路的感应电动势 E_M 为

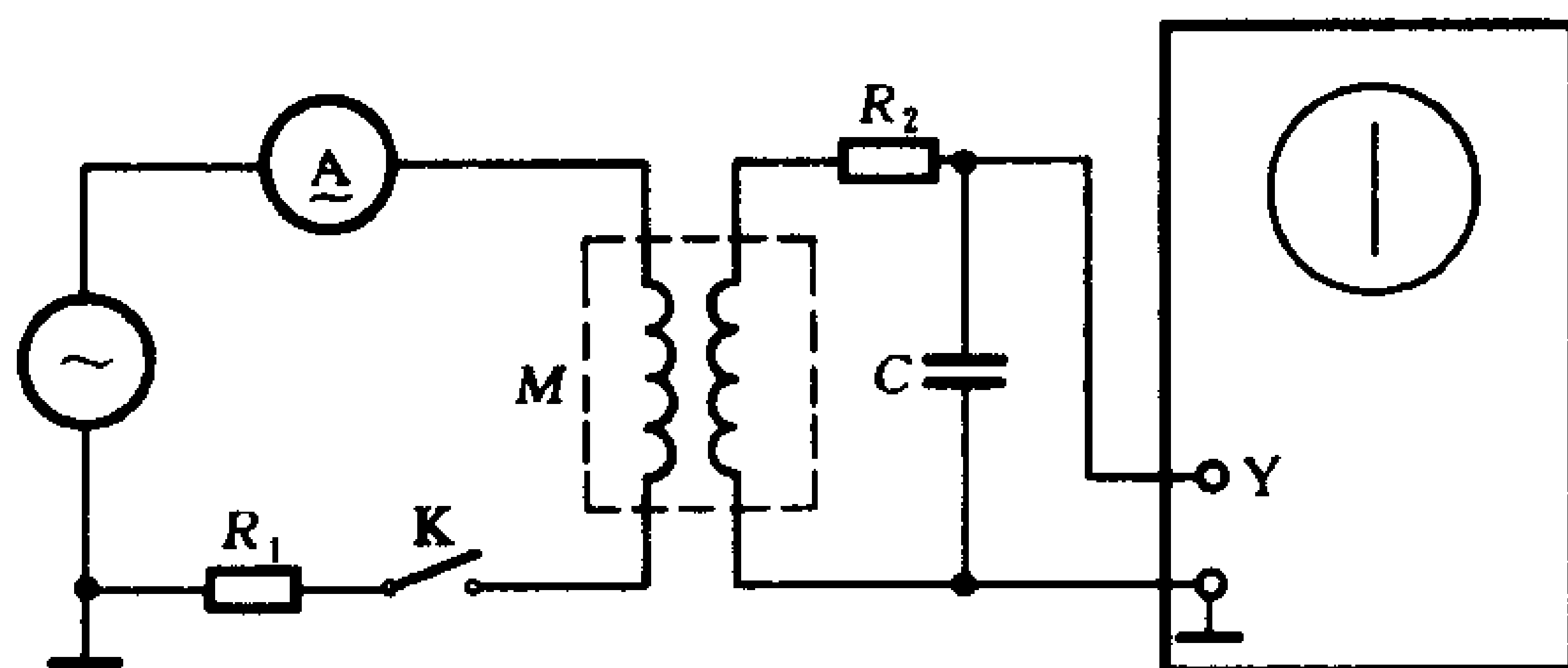


图 21－5　B 定标电路图

$$E_M = -M\frac{\mathrm{d}I_M}{\mathrm{d}t}$$

又因为只有当 $E_M = E_{感}$ 时，电容 C 两端的电压才会相同（即(21－5)式的值等于(21－3)式的值），

$$M\frac{\mathrm{d}I_M}{\mathrm{d}t} = N_2 S\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

两边积分　$$MI_M = N_2 SB$$

相应有　$$MI_{Mm} = N_2 SB_m$$

故　$$B_m = \frac{MI_{Mm}}{N_2 S} = \frac{\sqrt{2}MI_M}{N_2 S}\ (\mathrm{T}) \qquad (21-8)$$

式中 M 单位为亨利、S 单位为平方米，I_M 单位为安培．

实验内容

1．按图 21－3 接好电路．

2．对样品进行交流退磁：调节音频振荡器电压至样品达到磁

饱和所需电压值，然后逐渐减小电压值至零，这样实现交流退磁.

3. 调节音频振荡器输出电压的大小，调节示波器的 Y 衰减与微调旋钮，使磁滞回线具有适当的大小，以致使饱和磁滞回线不超标尺范围为宜. 记下 $\pm H_m$、$\pm B_m$、$\pm H_c$，$\pm B_r$ 各点的位置.

4. 对 X 轴按 H 值定标

按图 21－4 接线，在严格保持示波器增益不变的条件下，逐渐增加音频振荡器的输入电压，使荧光屏上的水平线段等于 $-H_m$ 到 $+H_m$ 的长度，记下此时安培表的读数 I_1 值，读三次取平均，代入(21－1)式，计算 H_m 值，同理可计算 $\pm H_c$ 值.

5. 对 Y 轴按 B 值定标

按图 21－5 接线，在严格保持示波器增益不变的情况下逐渐增加音频振荡器的输入电压，使荧光屏上的垂直线段等于 $-B_m$ 到 $+B_m$ 的长度，记下此时安培表的读数 I_M 值，读三次取平均，代入(21－8)式计算 B_m 值. 同理可以计算 B_r 值.

6. 计算结果的误差

先求出 $\frac{\Delta H}{H}$ 及 $\frac{\Delta B}{B}$，再算出 ΔH、ΔB 值，由(21－2)及(21－8)可知

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta N_1}{N_1} + \frac{\Delta I_1}{I_1} + E_D$$

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta N_2}{N_2} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta I_M}{I_M} + E_D$$

式中 E_D 为示波器荧光屏读数相对误差.

由测得的 H、B 值即可计算 ΔH、ΔB 值.

预习思考题

1. 什么叫动态磁滞回线？

2. 用示波法为什么能测动态磁滞回线？

3. 用示波法测量铁磁物质动态磁滞回线为什么要对示波器定标？怎样

对示波器定标?

复习思考题

1. 图 21 - 3 中将 U_{R_1} 接至示波器的 X 输入端，将 U_C 接入 Y 输入端，为什么用电学量 U 来测量磁学量 H 和 B?

2. 说明本实验中退磁原理?

3. 磁滞回线包围面积的大小有何意义?

4. 分别说明 H_m、B_m、H_c、B_r 的物理意义?

5. 本实验能测交流基本磁化曲线吗? 如何测量?

6. 应怎样选取图 21 - 3 中的 R_1、R_2、C、f 的大小?

实验二十二　电子束线的偏转

目的

1. 研究带电粒子在电场和磁场中偏转的规律；
2. 了解电子束线管的结构和原理.

仪器和用具

示波管、毫伏表、电子束线管测试板、直流电源、安培表和万用电表.

原理

示波器中用来显示电信号波形的示波管和电视机里显示图像的显象管都属于电子束线管，尽管它们的型号和结构不全相同，但都有产生电子束的系统和对电子加速的系统；为了使电子束在荧光屏上清晰地成像，还要有聚焦、偏转和强度控制等系统. 早期的电子束管没有聚焦功能，采用管外线圈产生的纵向磁场实现聚焦. 本实验仅讨论电子束线的偏转特性及其测量方法.

1. 电子束在电场中的偏转

假定由阴极发射出的电子其平均初速近似为零，在阳极电压作用下，沿 z 方向作加速运动，则其最后速度 v_z 可根据功能原理求出来，即

$$eU_A = \frac{1}{2}mv_z^2$$

移项后得到

$$v_z^2 = \frac{2eU_A}{m} \tag{22-1}$$

式中 U_A 为加速阳极相对于阴极的电势，e/m 为电子的电荷与质量之比（简称比荷，又称荷质比）. 如果在垂直于 z 轴的 y 方向上

设置一个匀强电场，那么以 v_z 速度飞行的电子将在 y 方向上发生偏转，如图 22－1 所示．若偏转电场由一个平行板电容器构成，板间距离为 d，极间电势差为 U，则电子在电容器中所受到的偏转力为

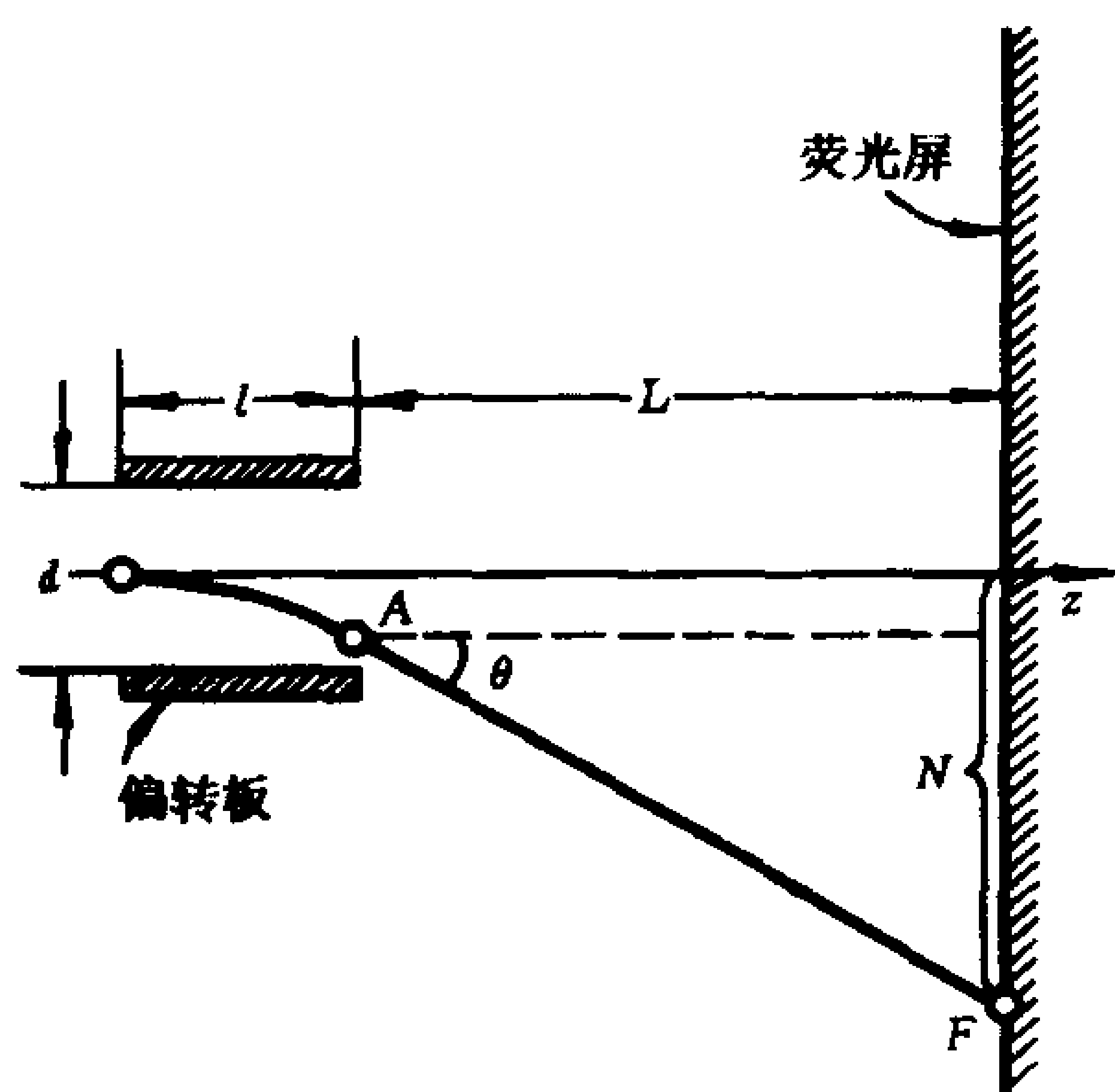


图 22－1　电场偏转

$$F_y = eE = \frac{eU}{d} \tag{22-2}$$

根据牛顿定律，

$$F_y = m\ddot{y} = \frac{eU}{d}$$

因此

$$\ddot{y} = \frac{e}{m}\frac{U}{d} \tag{22-3}$$

即电子在电容器的 y 方向上作匀加速运动，而在 z 方向上作匀速运动，电子横越电容器的时间为

$$t = l/v_z \tag{22-4}$$

当电子飞出电容器后，由于受到的合外力近似为零，于是电子几乎作匀速直线运动，一直打到荧光屏上，如图 22－1 里的 F 点．整理以上各式可得到电子偏离 z 轴的距离

$$N = K_E \frac{U}{U_A} \qquad (22-5)$$

式中

$$K_E = \frac{Ll}{2d}\left(1 + \frac{l}{2L}\right)$$

是一个与偏转系统的几何尺寸有关的常量．所以电场偏转的特点是：电子束线偏离 z 轴(即荧光屏中心)的距离与偏转板两端的电压成正比，与加速极的加速电压成反比．

2．电子束在磁场中的偏转

如果在垂直于 z 轴的 x 方向上设置一个由亥姆霍兹线圈①所产生的恒定均匀磁场，那么以 v_z 速度飞越的电子在 y 方向上也将发生偏转，如图 22－2 所示．假定使电子偏转的磁场在 l 范围内均匀分布，则电子受到的洛伦兹力大小不变，方向与速度垂直，因而电子作匀速圆周运动，洛伦兹力就是向心力，所以电子旋转的半径

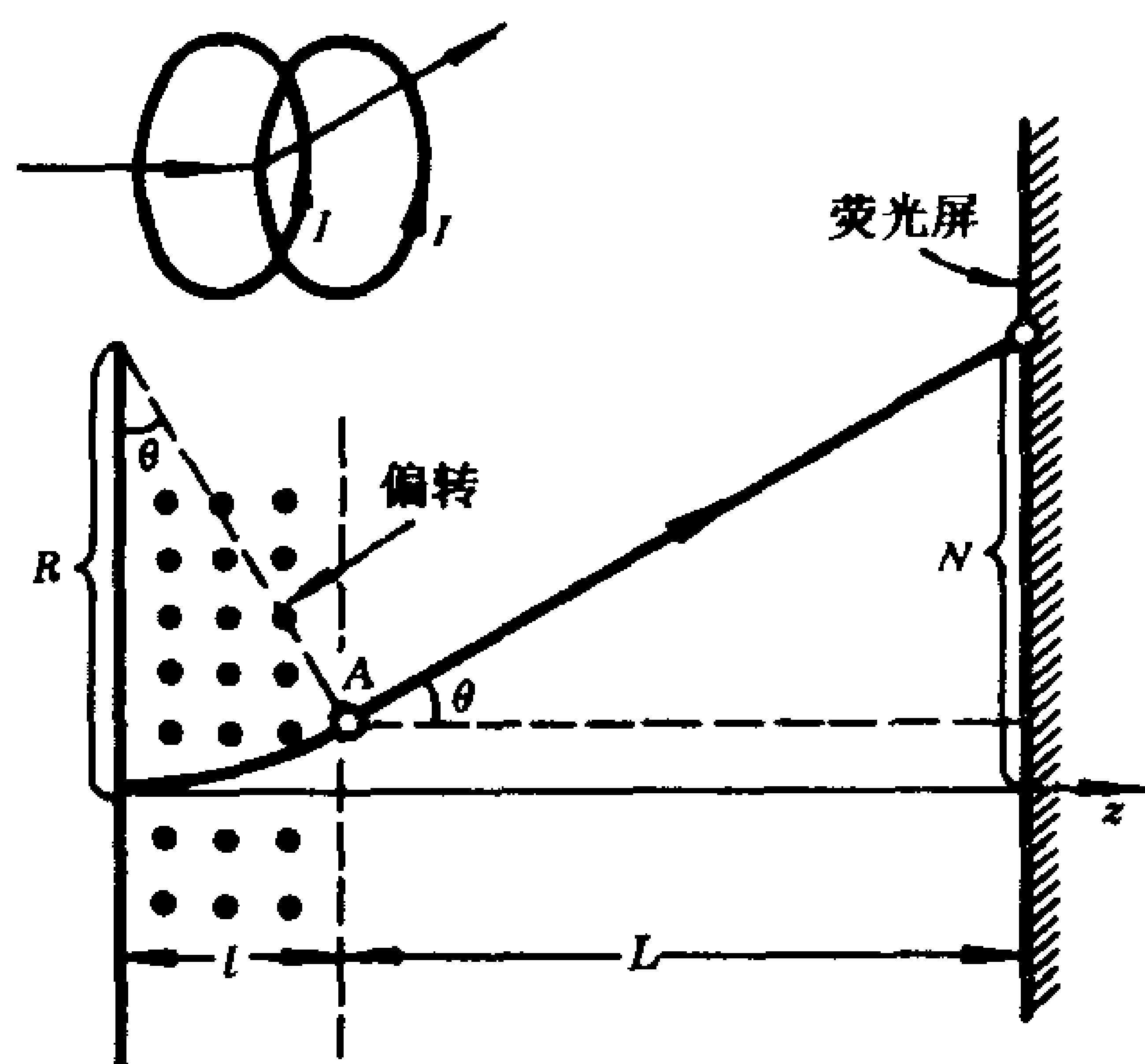


图 22－2　磁场偏转

① 有关亥姆霍兹线圈和磁场的分布，参阅本书实验十六"磁场的描绘"．

$$R = \frac{mv_z}{eB} \tag{22-6}$$

当电子飞到 A 点时将沿着切线方向飞出，直射荧光屏，由于磁场由亥姆霍兹线圈产生，因此磁场强度

$$B = kI \tag{22-7}$$

式中 k 是与线圈半径等有关的常量，I 为通过线圈的电流值. 将(22-1)、(22-7)式代入(22-6)式，再根据图 22-2 的几何关系加以整理和化简，可得到电子偏离 z 轴的距离

$$N = K_M \frac{I}{\sqrt{U_A}} \tag{22-8}$$

式中

$$K_M = \frac{Llk}{\sqrt{2}}\left(1 + \frac{l}{2L}\right)\sqrt{\frac{e}{m}}$$

也是一个与偏转系统几何尺寸有关的常量. 所以磁场偏转的特点是：电子束的偏转距离与加速电压的平方根成反比，与偏转电流成正比.

实验内容

一、研究和验证示波管中电场偏转的规律

检验：① 加速电压不变时，偏转距离与偏转电压是否成正比，

② 偏转电压不变时，偏转距离与加速电压是否成反比.

实验线路板如图 22-3 所示. 图中 f、f 为示波管灯丝引出端，K 为阴极，G 为栅极，也称调制极，与 -1 100 V 电源直接相连，A_1、A_2 和 A_3 分别为第一、第二和第三阳极，其中 A_1 与 A_3 已在示波管的管内连接好，X_1、X_2 和 Y_1、Y_2 为 X 方向和 Y 方向偏转板. 由 w_K、w_2、w_1 和 w_3 等组成了电源分压器，分压器的 S_1、S_2 和 S_E 以及 f、f 等端钮分别与 -1 100 V、300 V 和地线以及灯丝端钮相连，改变 w_K、w_2、w_1 和 w_3 的滑动端位置可得到各种所需电压.

w_K 与阴极 K 相连，可改变阴栅之间的电势，起到改变光点亮度的作用，w_2 与 A_2 相连，可改变第二阳极电位，而使荧光屏上的光斑聚焦成细小的亮点，w_1 与 A_1、A_3 相连，可改变第一、第三阳极电势，同样起聚焦的作用，w_3 与 Y_1 相连，可改变 Y 偏转板间的电势，使电子束偏转. 注意，示波管与实验线路板之间通过导线连接，用接插件互通.

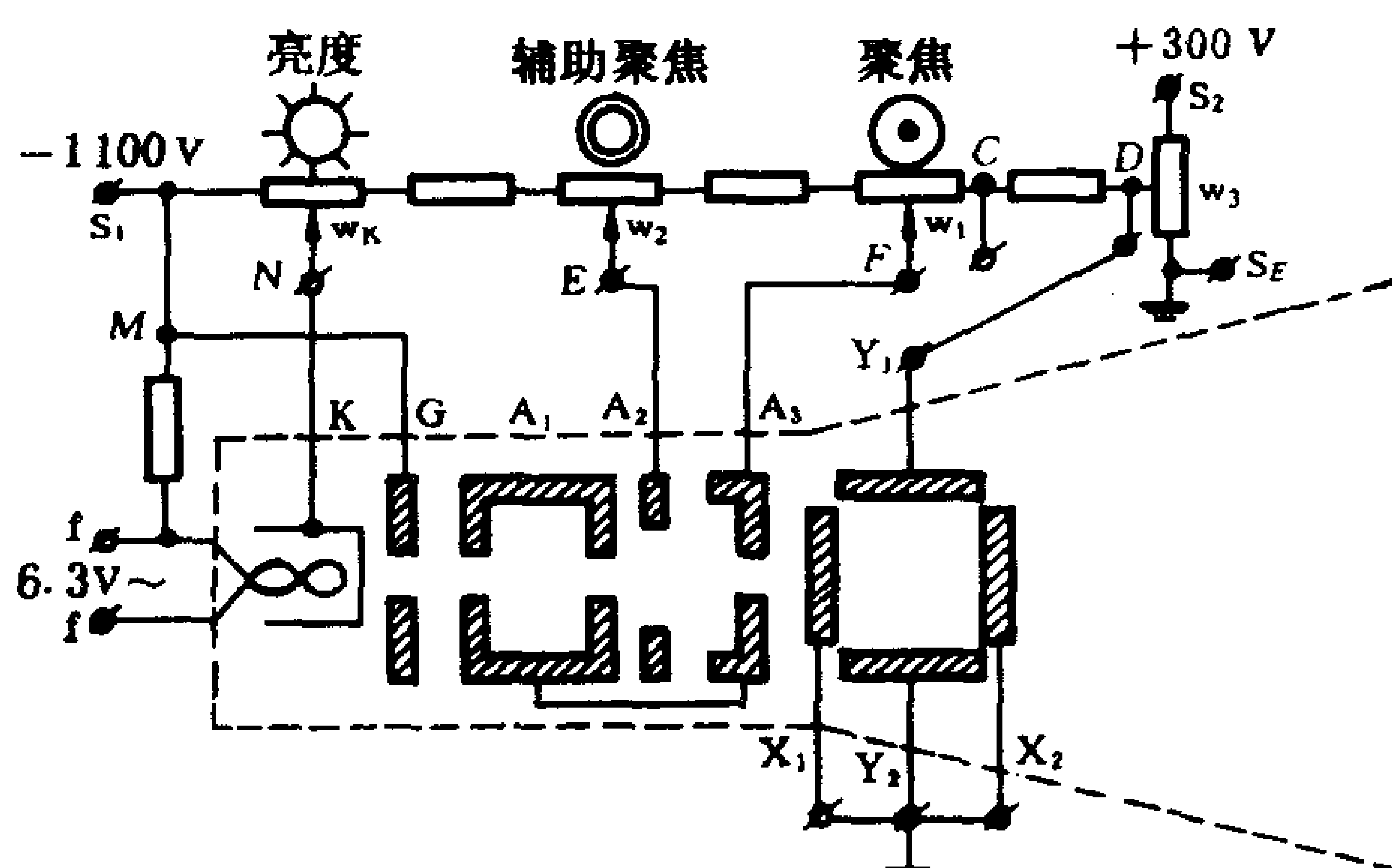


图 22－3　电场偏转接线图

偏转距离可根据荧光屏前有机玻璃板上的刻度数读出，U_A 是 A_3 和 K 间的加速电势差，用高阻抗直流高压表测量，U①为偏转电压，用万用表直流电压档测量，即测量偏转板与地之间的电势差.

1. 测量

在仪器容许范围内取 4～5 个不同的加速电压 U_A，对每一 U_A 测量偏转为 −4、−3、−2、−1、0、1、2、3、4 格的偏转电压（U_X 或 U_Y）.

2. 数据处理

① X 方向偏转电压用 U_X 表示，Y 方向用 U_Y 表示.

为了检验①,取偏转距离 N(格)为横坐标,偏转电压(U_X 或 U_Y)为纵坐标作图线(图 22-4),如果对每一 U_A 均为直线,则可认为加速电压不变时,偏转距离与偏转电压间是线性关系.

为了检验②,应将图 22-4 中坐标原点由 O 移到 O' 点,作如下变换

$$N' = N - N_O, \quad N = N' + N_O$$

$$U'_X = U_X - U_{XO}, \quad U_X = U'_X + U_{XO} \qquad (22-9)$$

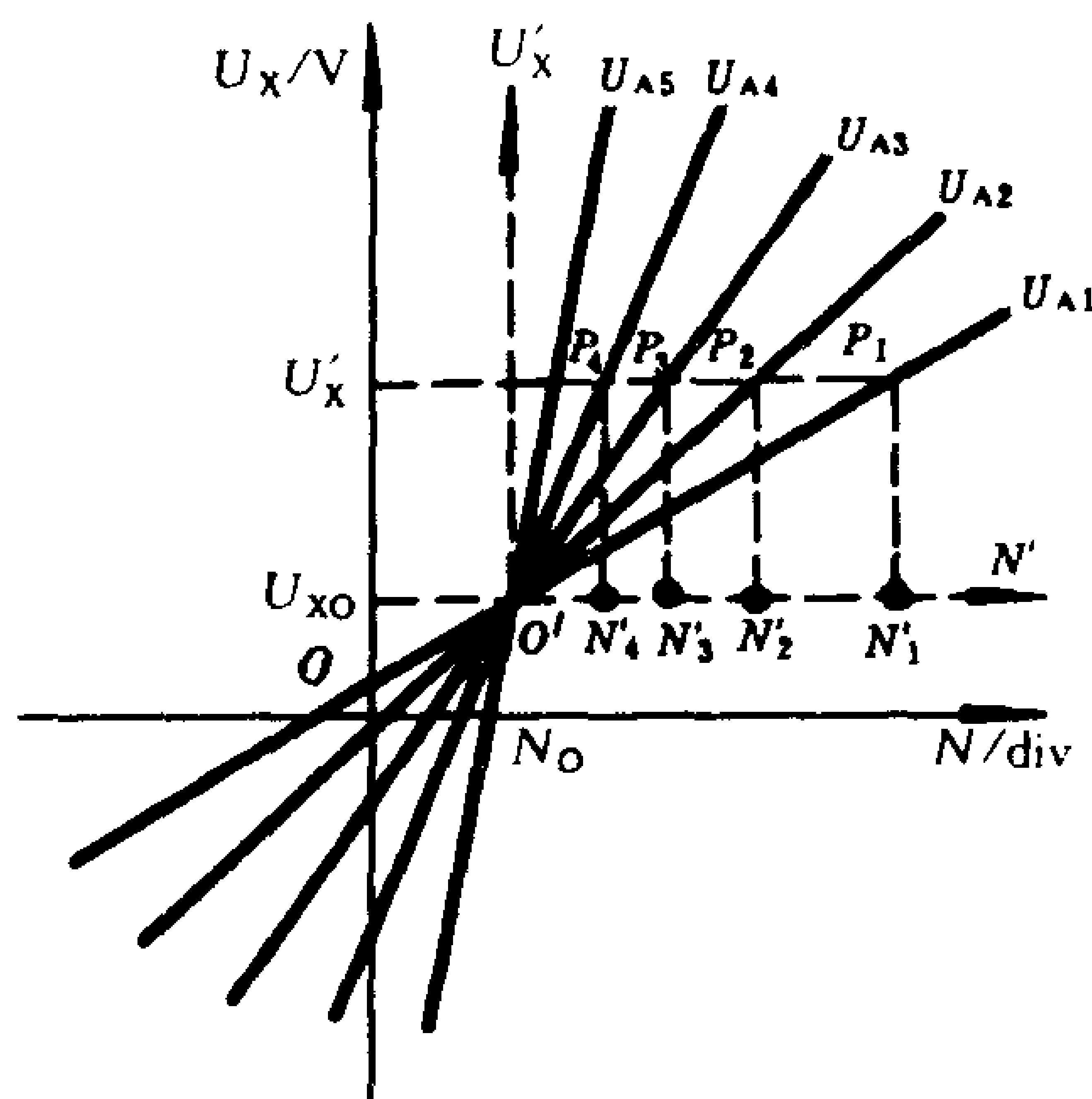


图 22-4　U_X-N 关系曲线

因而(22-5)式变为

$$N' = K_E \frac{U'_X}{U_A} \text{ 和 } N_O = K_E \frac{U_{XO}}{U_A} \qquad (22-10)$$

为了验证 N' 与 $\frac{1}{U_A}$ 成正比,在 $U'_X O'N'$ 坐标的 $O'U'_X$ 轴上任取一点,例如 U'_X,过 U'_X 点作 $O'N'$ 轴的平行线,交 $O'U_{A1}$、$O'U_{A2}$、…、$O'U_{A5}$ 诸线于 P_1、P_2、…、P_5 点,如果关系式

$$N'_1 U_{A1} = N'_2 U_{A2} = \cdots = N'_5, U_{A5} = \text{常量} \qquad (22-11)$$

成立,就验证了(22-10)式.

二、研究和验证显象管中磁场偏转的规律

检验：① 加速电压不变时，偏转距离与偏转电流成正比. ② 偏转电流不变时，偏转距离与加速电压的平方根成反比.

实验线路如图 22－5 所示. 图中 f、f 为显象管灯丝引出端，K、G 分别为阴极、栅极. A_1、A_2 和 A_3 分别为第一、第二和第三阳极，S_1 和 S_2 为偏转线圈，它是亥姆霍兹线圈的变形，紧固在显象管玻璃壳外的颈部，S_1 与 S_2 相互串联，并再串一只 10.0 Ω 的电阻，然后接到 12 V 交流电源上. 用交流电压表测量电阻两端的电压就可算出流过偏转线圈的电流值. 为了在显象管内产生、加速和聚焦电子束，还必须在它的灯丝 f、f 两端加上 12 V 交流电压[①]，调节 w_K 可改变荧光屏上光点的亮度，调节 w_2 使光点聚焦，特别是第四阳极的电压 U_A 起加速电子向荧光屏飞行的作用. 由于电

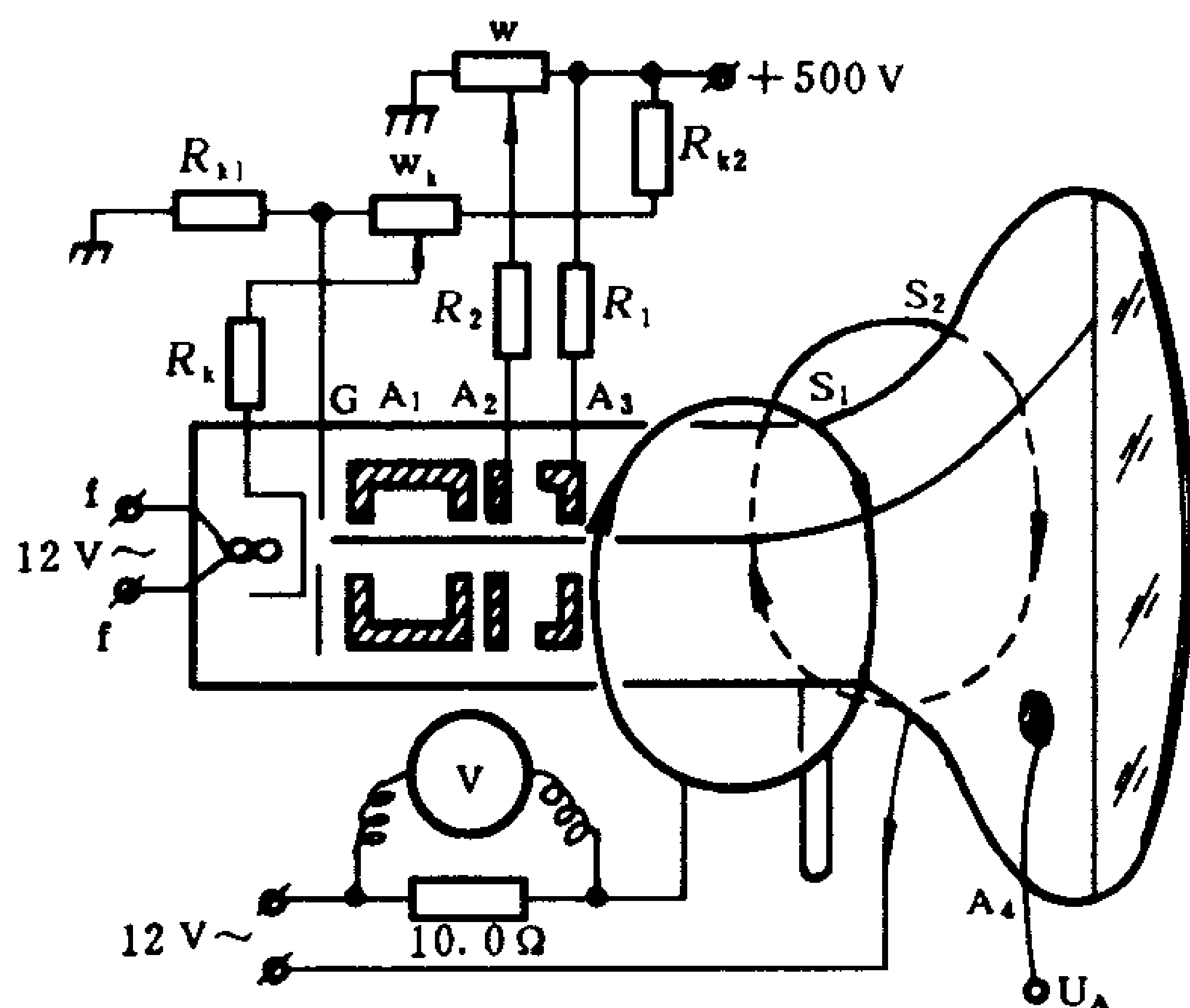


图 22－5 磁场偏转的实验线路

① 本实验使用的显象管型号为 23SX5B，其灯丝电压为 12 V，不同型号显象管的灯丝电压不全相同.

压较高，接线比较麻烦，容易跳火又不安全，因此显象管及其附属电源和偏转电压（或电流）供给部分全部都接好在仪器内，同学们可打开电子束线管测试仪器盖，在断开电源时仔细辨认几个组成部分.

偏转距离 N，可用透明薄膜制成的软尺在荧光屏上量度，加速电压 U_A 由电子束线测试仪的高压表直接读出，或者用高阻抗电压表（例如 Q3－V 型高压静电表）测量，但这种表价格昂贵，要特别注意安全. 偏转电流是通过 DA－16 型晶体管电压表来测量 10.0 Ω 两端的电压，然后算出.

测量某一加速电压 U_A 时，偏转 1.0、2.0、3.0、…格对应的电流 I(mA)，U_A 可在 5 000～1 000 V 间取几个值.

以偏转格数 N 为横坐标，电流 I 为纵坐标，作各种 U_A 时的 $I-N$ 图线，仿电场偏转的数据处理，验证①和②.

预习思考题

1. 电子束偏转的方法有几种？它们的规律各是什么？

2. 在电场偏转中，偏转板长短（即 l）对偏转距离有什么影响？示波管 13SJ37 在 Y 方向的偏转灵敏度约为 24 ($V\cdot cm^{-1}$)，X 方向偏转灵敏度约为 25 ($V\cdot cm^{-1}$). 问：若 X 和 Y 偏转板都加 300 V 偏转电压，电子束在哪一个方向上偏得大？各偏多大距离？在示波管中，哪一对偏转板更靠近荧光屏？为什么？

3. 是否能用一只圆电流线圈作为偏转线圈使电子束线随电流作线性偏转？欲使电子束能达到荧光屏上任意一点，要几对偏转线圈？应怎样安放？

复习思考题

1. 根据实验结果回答如下问题：

(1) 在加速电压不变的条件下，偏转距离是否与偏转电压或者偏转电流成正比？

(2) 在偏转电压或者偏转电流不变的条件下，偏转距离与加速电压有什么关系？

2. 试比较两种偏转法的优缺点. 可从以下二方面考虑:

(1) 比较 U_X(或 U_Y) − N 曲线与 $I-N$ 曲线的直线性质;

(2) 比较示波管与显象管的偏转角度 θ(见图 22−1 和图 22−2).

3. 怎样用电子束线管检查周围空间有否磁场?

实验二十三　电子束线的聚焦

目的

1. 研究带电粒子在电场和磁场中聚焦的规律；
2. 了解电子束线管的结构和原理；
3. 掌握测量电子比荷(又称荷质比)的一种方法.

仪器和用具

示波管、电源、试验板、螺线管、螺线管用直流电源、直流电流表、高内阻高压量程电压表.

原理

1. 示波管的构造

示波管是在抽空的玻璃外壳中装有一些电极，其内部结构可分为三部分：电子枪、偏转板和荧光屏. 图 23－1 为示波管的外形，图 23－2 为其内部结构剖面图.

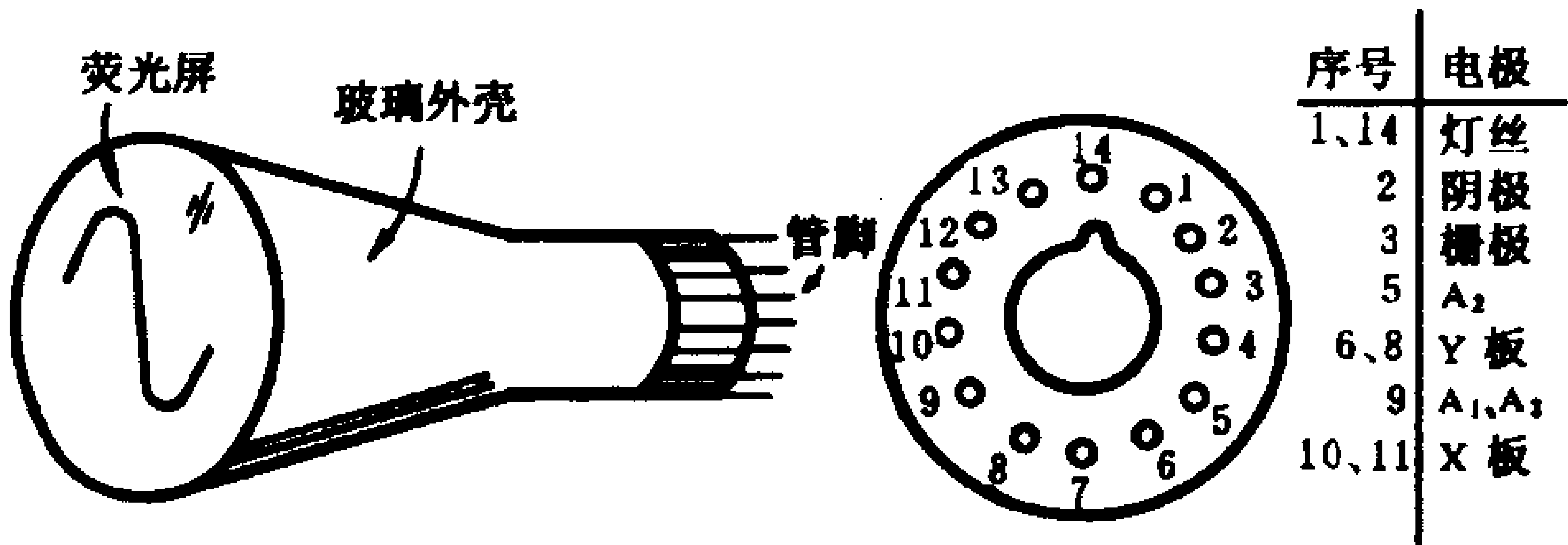


图 23－1　示波管外壳

(1) 电子枪

电子枪由灯丝(f、f)、阴极(K)、栅极(G，或调制极)、第一阳极(A_1)、第二阳极(A_2)、第三阳极(A_3)组成. 一般示波管的 A_3 和 A_1

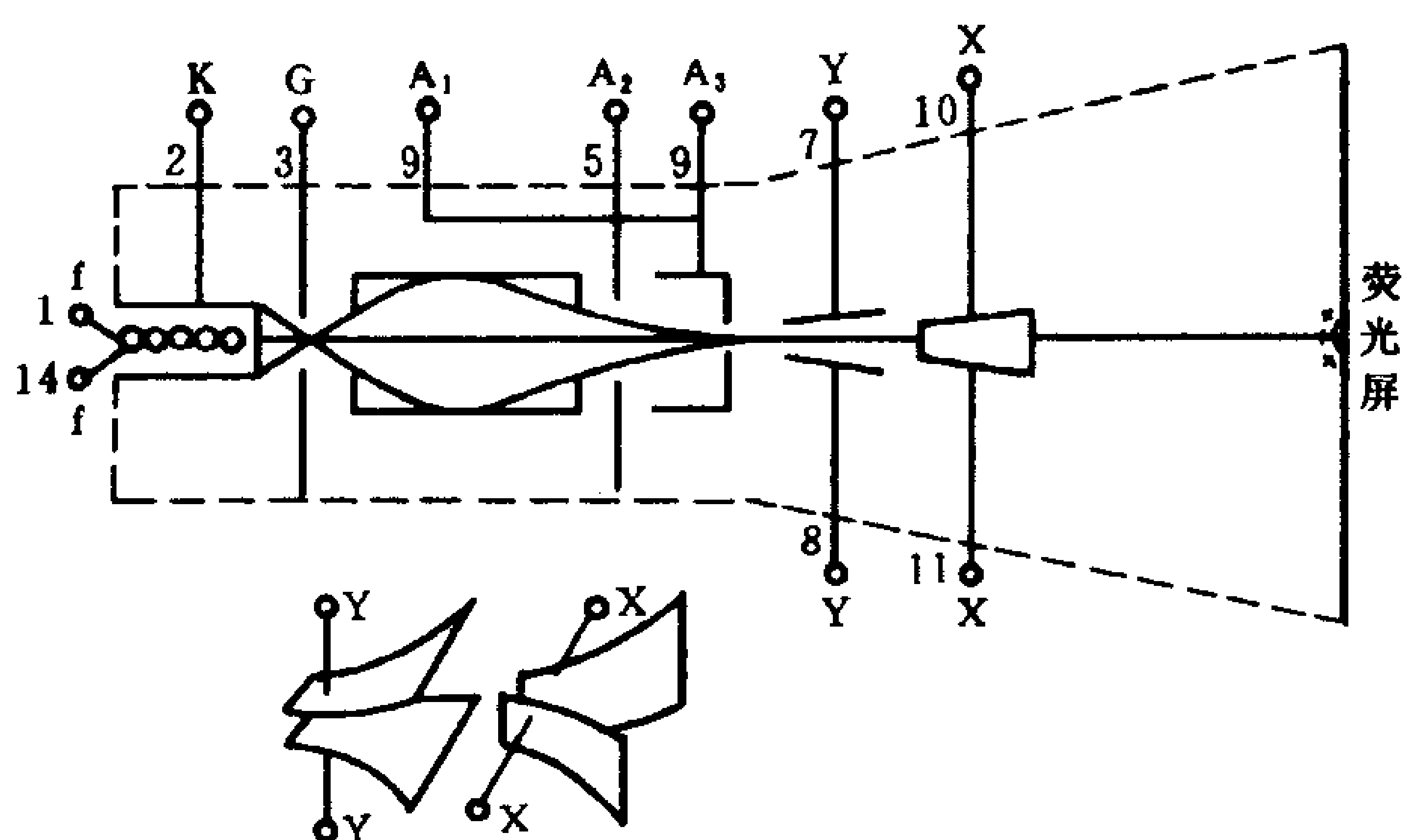


图 23-2　示波管的剖面

内部已经连在一起. 当灯丝两端加上 6.3 V 电压时,靠近它的阴极便加热,由于阴极表面涂有氧化物,所以当温度升高时,阴极表面的电子很易脱出表面跑到周围的真空空间里,成为游离状态的电子. 电子枪内的第一、三阳极都成圆筒形,而栅极和第二阳极呈圆板形,中间有小圆孔. 如果阴极、栅极和第一阳极按图 23-3 所示的线路连接,基于场的分布可以推出游离状态的电子在非均匀

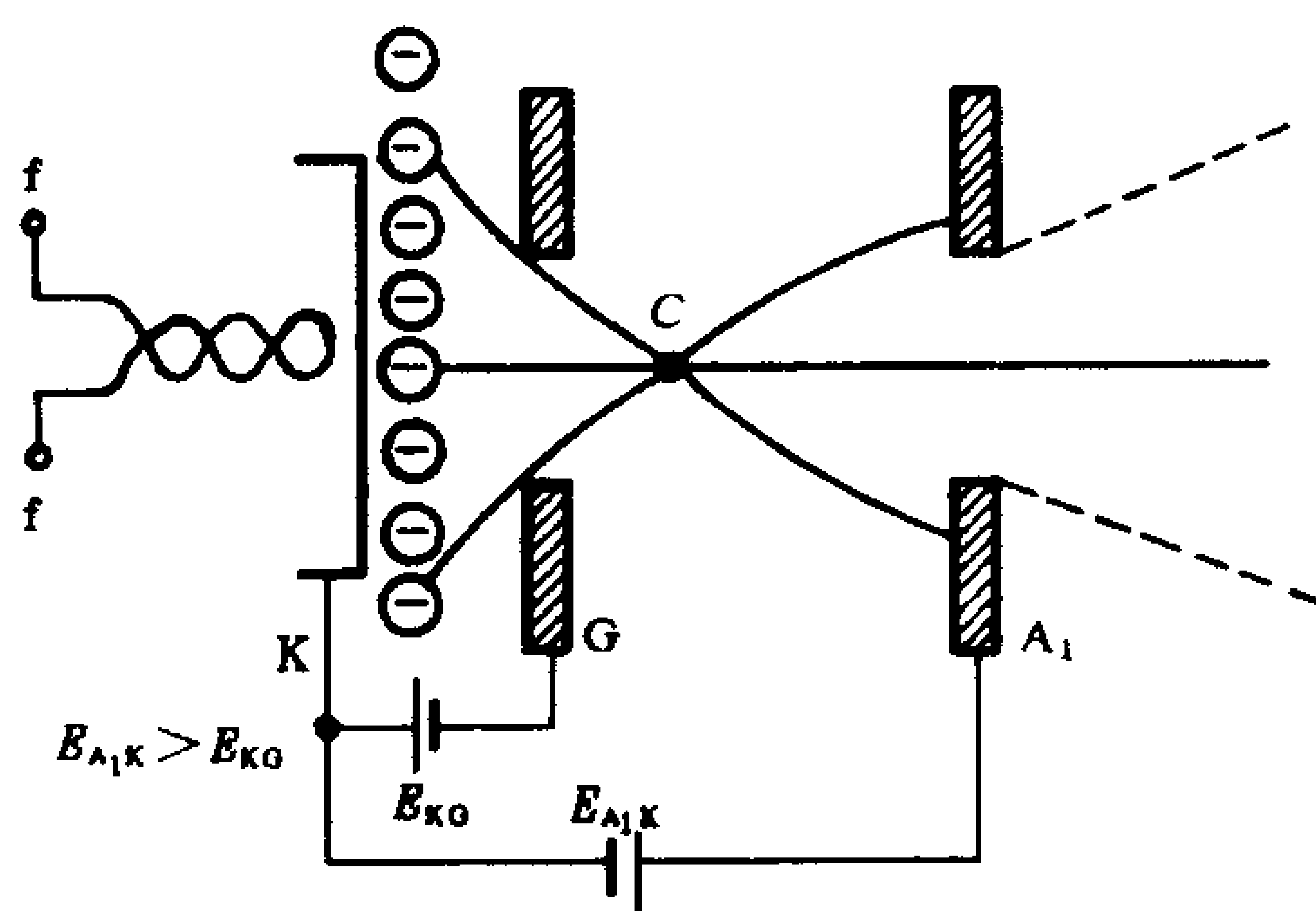


图 23-3　交叉点的形成

电场力的作用下在 C 处形成交叉点,(如果 E_{KG}反接能否形成交

叉点?)经过 C 点的电子在阳极电势作用下继续向荧光屏加速,最后在荧光屏形成一个圆形的光斑,光斑越小由它组成的波形越清晰,因此研究最小光斑的条件和规律,即电子束线在荧光屏上的聚焦是很重要的. 聚焦的方法有两种,电场会聚法和磁场会聚法.

(2) 偏转板

偏转板有两组,是平行板电容器(与板垂直的轴向剖面像喇叭口)的变形,如图 22-2 中的 X-X 为水平偏转板,Y-Y 为垂直偏转板.

当偏转板上加直流或交流电压时,电子束穿过时将产生偏转或振动,其偏转的大小和偏转电压成比例.

(3) 荧光屏

示波管外壳的前端涂有发光物质,在受到高速电子轰击时,它将电子的动能转换成光能辐射出来,在荧光屏上产生一小光斑. 当电子束偏转或振动时,光斑也有相应的移动,或由振动形成一亮线.

2. 电场会聚法

电场会聚法的基本思想是根据非均匀电场使电子束形成交叉点的原理.

电场会聚法的原理如图23-4所示,图中 $U_{A_1K} > U_{A_2K}$、U_{A_1K}

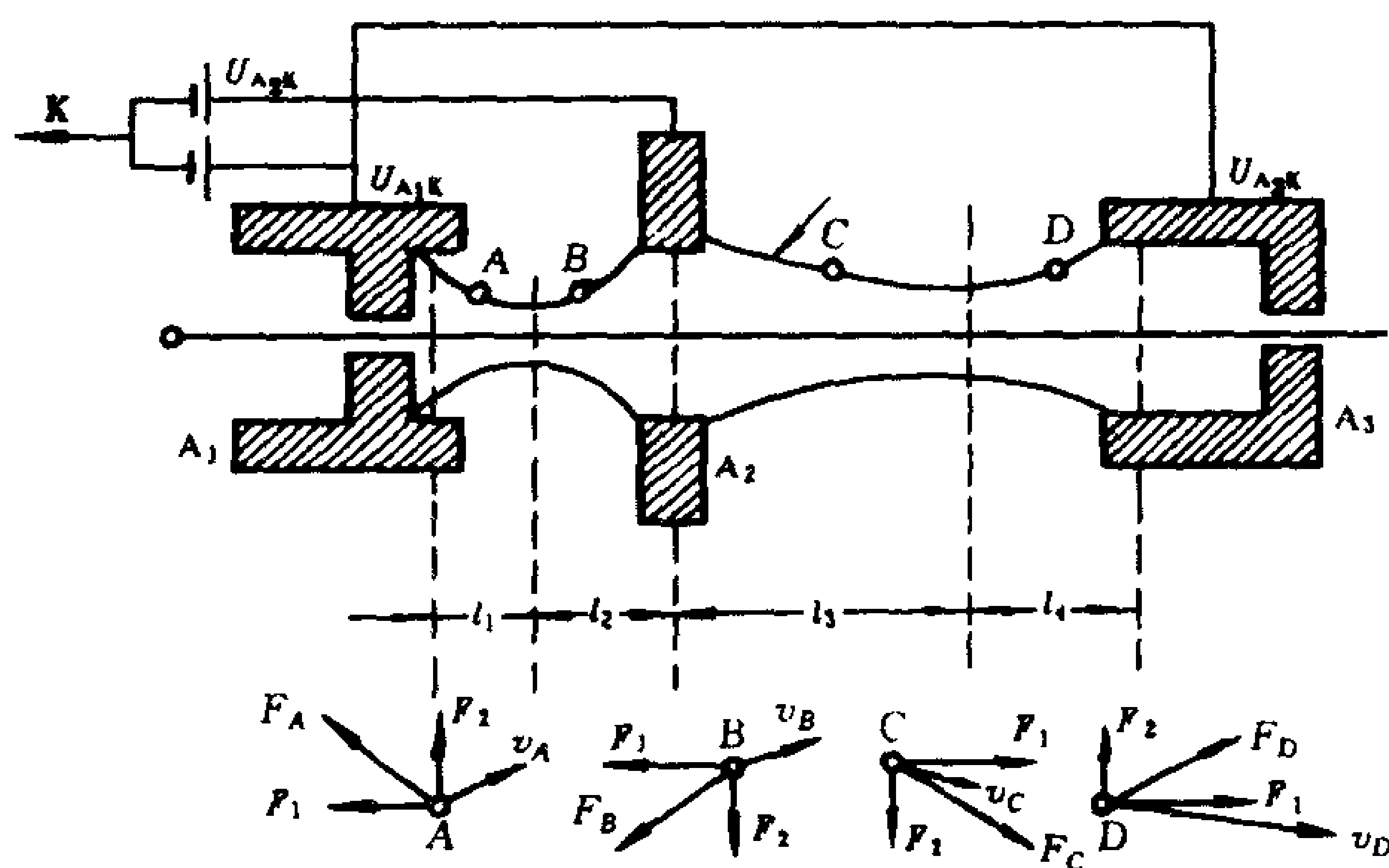


图 23-4 电子在电场中的受力分析

$= U_{A_3K}$、为了说明散射电子束在非均匀电场中的受力情况，我们取 A、B、C、D 四处的运动电子进行受力分解分析，图的下面是受力的矢量分解图. 注意：速度（矢量）方向不一定与电场力方向一致，而某点电场力的方向就是通过该点电场线（又称电力线）的切线方向. 由图可知，如果 U_{A_1K} 和 U_{A_2K} 的电势调节适当，电子就会加速飞过电子枪并受到指向轴线的中心会聚力，因而由交叉点 C 散射的电子束在荧光屏上会聚成一个非常细小的光斑，常称为聚焦的光点. 理论与实验证明了，不管亮度如何，聚焦的条件都是

$$G = \frac{U_{A_1K}}{U_{A_2K}} \approx \text{常数} \tag{23-1}$$

由于 $U_{A_1K} > U_{A_2K}$，因此 $G > 1$，这样的聚焦称为正向聚焦；若 $U_{A_1K} < U_{A_2K}$，即 $G < 1$，U_{A_1K} 与 U_{A_2K} 调节恰当也可以聚焦，称为反向聚焦，但是光点较暗.（为什么？）

3. 磁场会聚法

将示波管放在螺旋管磁场中，并将示波管的第一阳极、第二阳极、X 和 Y 偏转板都连在一起，使电子进入第一阳极后在等电势的空间运动. 由于栅极和第一阳极之间的距离较短，只有 1 mm 左右，又由于电子从阴极发射出来时初速度很小（仅相当于 0～1.5 V 下获得的速度），而阳极加速电压高达 700～1 000 V，所以可以认为各电子进入第一阳极时的轴向速度 v_{11} 是相同的，其大小由阳极电压 U_A 决定，因为

$$\frac{1}{2} m v_{\parallel}^2 = e U_A$$

所以

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{2eU_A}{m}} \tag{23-2}$$

式中 m 为电子质量，e 为电子电荷.

进入第一阳极的各电子的径向速度 $v_{\perp}$ 则有明显差异，在洛伦兹力 $F = ev_{\perp}B$（B 为磁感应强度）作用下，使电子在垂直 B 的

平面内作匀速圆周运动,其向心力就是洛伦兹力,即

$$\frac{mv_{\perp}^{2}}{R} = ev_{\perp} B \tag{23-3}$$

所以圆运动轨道半径 R 等于

$$R = \frac{mv_{\perp}}{eB} \tag{23-4}$$

其作圆运动一周的时间 T 为

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{eB} \tag{23-5}$$

上式表示,不论电子的径向速度 $v_{\perp}$ 的大小如何,它们完成一次圆运动的时间都相同,另外由于它们同是从轴线上一点出发作圆运动的,因而在经过时间 T 后又会都回到轴线上,不过由于轴向速度为 $v_{\parallel}$,再次回到轴上时,已前进了距离 $v_{\parallel} T$,即如图 23-5 所示,电子的运动轨迹是因 $v_{\perp}$ 而异的螺线,但螺距 h 都为

$$h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m}{eB} v_{\parallel} \tag{23-6}$$

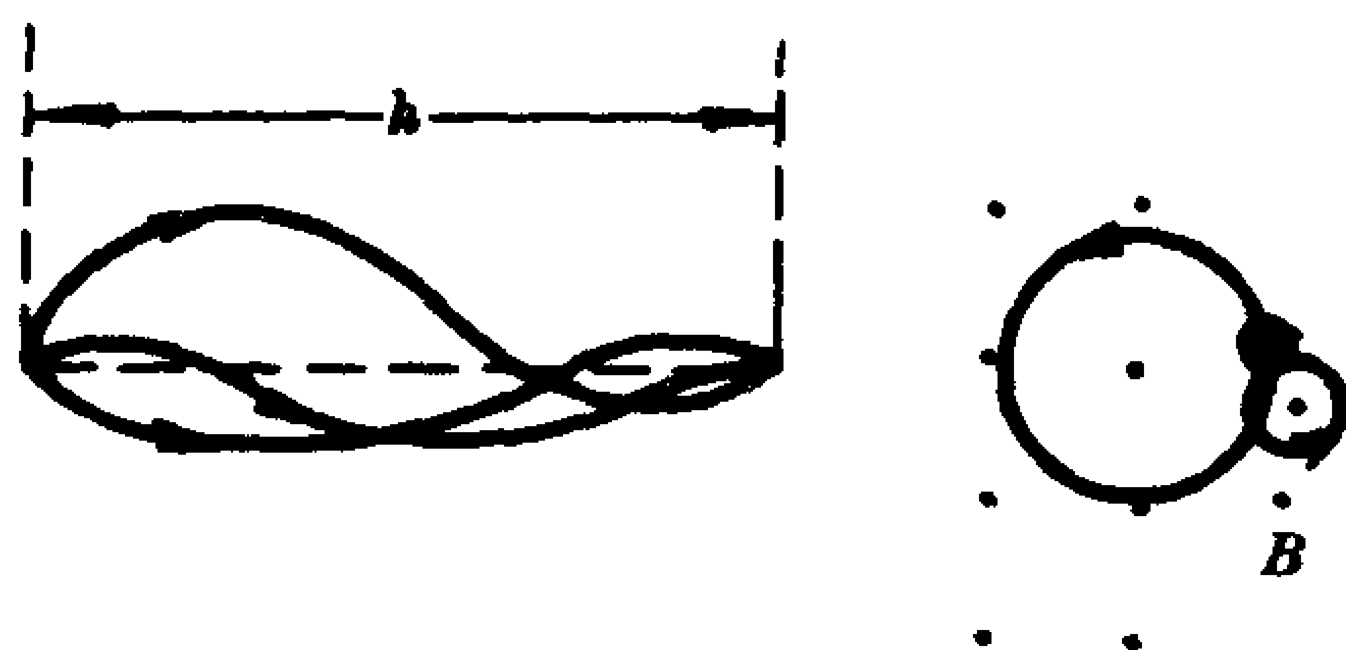


图 23-5

即在距第一交叉点为一个螺距 h 之点又重新会聚,如果调节磁场 B 使螺距 h 等于第一交点到屏的距离 l,则屏上将出现电子束会聚产生的小亮斑,这就是磁聚焦.

4. 电子比荷(e/m)的测量

从上述讨论可知,当调节 B 使屏上出现聚焦亮点时,

$$l = \frac{2\pi m}{eB}\sqrt{\frac{2eU_{A}}{m}} \tag{23-7}$$

整理后可得

$$\frac{e}{m}=\frac{8\pi^2 U_A}{l^2 B^2} \tag{23-8}$$

即测出 U_A、l 和 B 之后，可由上式算出电子比荷$\frac{e}{m}$之值.

又当继续调节 B，使 $h=\frac{1}{2}l$ 或 $h=\frac{1}{3}l$ 时，屏上将出现第二次、第三次聚焦.

螺线管中的磁感应强度 B 与励磁电流 I 的关系为

$$B=2\pi n_0 I(\cos\beta_1-\cos\beta_2)\times 10^{-7}$$

令 $$c=2\pi n_0(\cos\beta_1-\cos\beta_2)\times 10^{-7}$$

则 $$B=cI(\mathrm{T})$$

其中 n_0 为螺线管单位长的匝数，β_1 和 β_2 为螺线管的中心对管两端的张角.

用磁聚焦法测电子的比荷有相当明显的误差，产生误差的原因较多，例如示波管中电子枪的实际结构比较复杂，电场和外磁场的场强不会是理想的匀强分布，所以很难精确考虑，因此电子在场中的运动规律与实际有一定的偏离，反映在 l 不能准确地确定上. 此外，如果电子束的电流密度较大，加速电压甚低，那么电子间的相互排斥作用更为显著，造成电子束的扩张，这种效应称为空间电荷效应，不过，当“亮度”较低，加速电压很高时，空间电荷效应很小，由它引起测量 e/m 的系统误差可以大大减小.

实验内容

1. 电场聚焦

电子束线管的构造和电源供给部分，可参阅实验二十二中的图 22－3 和有关说明. 电场聚焦的实验线路可参看图 23－6. 将 A_2 与 E 连接，A_1、X_1、X_2、Y_1、Y_2 都与 F 连接，C 与 D 连接，因为 $U_{A_1K}>U_{A_2K}$，所以这样的聚焦属于正向电场聚焦. 调节 w_K 使荧

光屏上有不太亮的光斑，再分别调节 w_1 和 w_2，直到光斑不能再小为止，即实现了聚焦. 再用高内阻电压表测量 U_{A_1K} 和 U_{A_2K} 值，根据(23-1)式可求得 G 值. 取三种不同亮度的光斑，测量 G 值，最后求平均值.

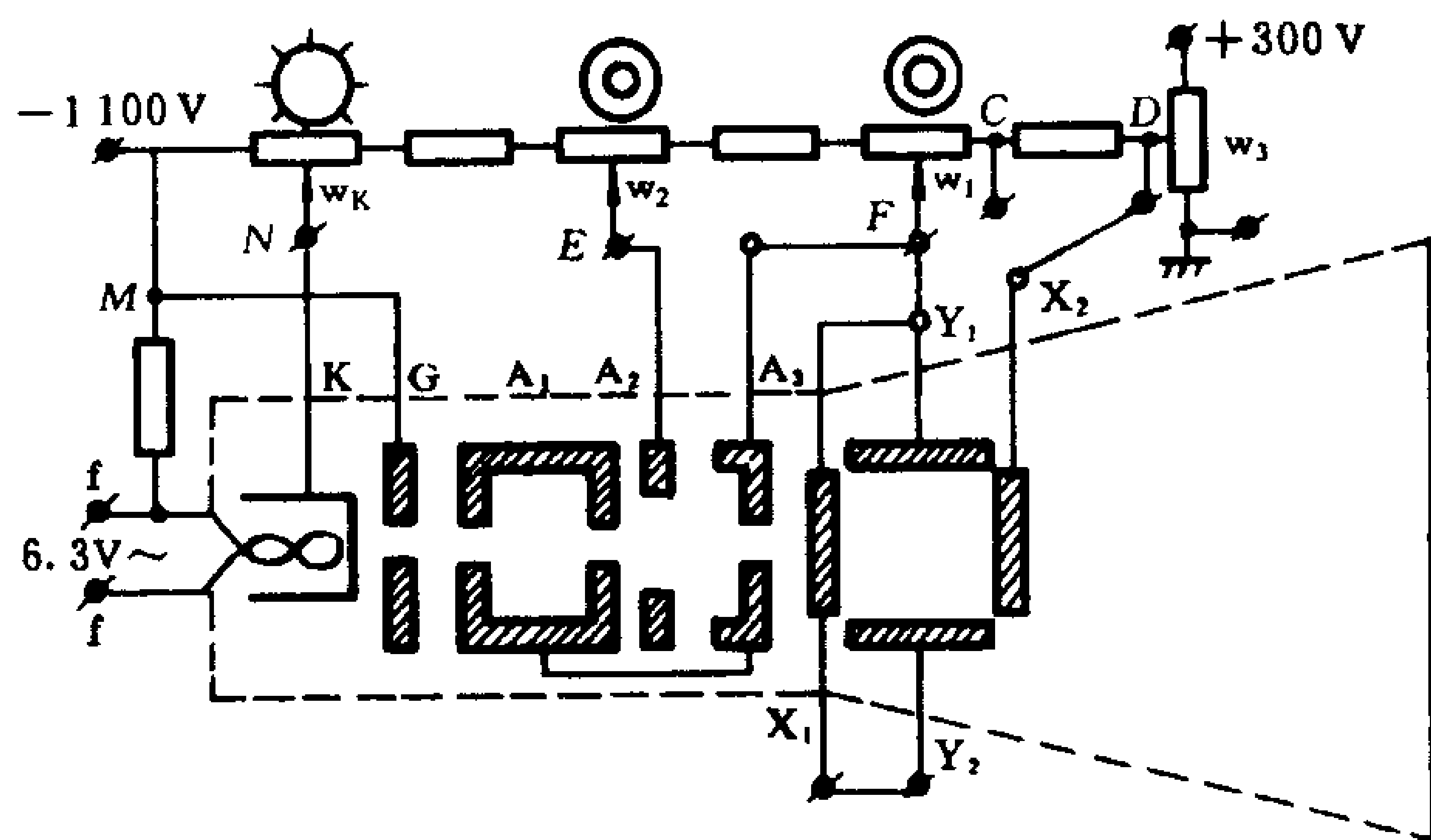


图 23-6 电场聚焦实验线路

将 A_2 与 F 连接，A_1、X_1、X_2、Y_1、Y_2 与 E 连接，C 与 D 连接，因为 $U_{A_1K} < U_{A_2K}$，所以这样的聚焦称反向电场聚焦，按同样的方法可求得反向电场聚焦的 G 平均值.

2. 磁场聚焦和 e/m 的测定

将示波管置于螺线管内，尽量使二者的轴线一致. 把示波管的第一、第二阳极和 X、Y 偏转板都和 F 连在一起.

将螺线管和直流电源相接，并将电流计串联其中去测励磁电流 I.

使加速电压 U_A 取某一值(例如 800 V)，由小到大调励磁电流，测出第一、二、三次聚焦的电流 I_1、I_2、I_3.

将 U_A 在可调范围内改变 5 次，重复测其聚焦电流.

螺线管常数 c 由实验室提供.

可以用米尺或测高仪测量栅极到屏的距离，由于示波管一般在管壳内壁上涂有黑色的石墨粉，交点到荧光屏的距离 l 值不能直接测量，只能在 X 光透视片上测量.

为了减小空间电荷效应，比较准确地求得电子的比荷，取 $U_{AK}=1.4\text{kV}$ 左右，"亮度"尽可能暗，即调节 w_K，使滑动端向右移动. 同样测量第一、二、三次聚焦时的螺线管电流值.

将测量出的 I_2、I_3 折合成 I_1 去计算.

参照式(23-8)计算 e/m 值及不确定度.

3. 对测量中的观察结果和测量值的差异情况进行分析说明.

注意事项：

(1) 示波管电源供给电压甚高，操作前务必先断开电源然后才能动手操作.

(2) 示波管外壳玻璃容易碰碎飞溅，操作、安放必须注意安全可靠.

(3) 聚焦点的亮度太强会烧毁荧光屏，因此实验时尽可能降低亮度，减少光点停留时间.

预习思考题

1. 示波管内是否必定有交叉点？交叉点位置与哪些因素有关？

2. 电场聚焦的条件是什么？怎样的聚焦称为正向聚焦？

3. 磁场聚焦的条件是什么？

4. 怎样用磁场聚焦法测量电子比荷？

复习思考题

1. 正、反向电场聚焦的 G 值各等于多少？

2. 为什么反向电场聚焦的光点亮度很暗？反向电场聚焦是否总能实现？

3. 示波管亮度变化为什么会影响聚焦？

4. 用短螺线管产生的纵向磁场能否实现电子束线的聚焦?

5. 电子比荷的公认值为:1.759×10^{11} $C\cdot kg^{-1}$. 试比较实验结果,并且分析产生误差的原因.

6. 怎样建立交叉点? 如果没有交叉点能否实现电子束线的聚焦?

7. 调节示波器"辉度"时为何要同时调节"聚焦"和"辅助聚焦"电位器?(提示:"辉度"就是 w_K,"聚焦"就是 w_2,"辅助聚焦"就是 w_1,见图 23-7 所示)

实验二十四　交流电路功率的测量

目的

1. 学习交流电路中功率及功率因数的测定方法；

2. 加深对功率因数概念的理解，进一步了解交流电路中电阻、电容、电感等元件消耗功率的特点；

3. 学习一种提高交流电路功率因数的方法.

仪器和用具

负载(铁芯电感为 40 W 日光灯镇流器，阻值为 300 Ω 左右的变阻器)、电动型瓦特表(低功率因数瓦特表 D34－W 型额定电流为 0.5 A、1 A，额定电压为 150 V、300 V、600 V，功率因数 $\cos\varphi = 0.2$)、铁磁电动型交流电压表、电磁型电流表、电容(0.5 μF、1 μF、2 μF、4 μF、10 μF 各一个)、调压变压器、示波器、音频信号发生器、MF－20 型晶体管万用表、双刀双掷开关两个等.

原理

一、交流功率及功率因数

在直流电路中、功率就是电压和电流的乘积，它不随时间改变. 在交流电路中，由于电压和电流都随时间变化，因而它们的乘积也随时间变化，这种功率称为瞬时功率 p.

设交流电路中通过负载的瞬时电流 i 为

$$i = I_m \sin \omega t \qquad (24-1)$$

负载两端的瞬时电压 u 为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \qquad (24-2)$$

则瞬时功率

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin(\omega t)\sin(\omega t + \varphi) \qquad (24-3)$$

平均功率

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^T U_m I_m \sin(\omega t)\sin(\omega t + \varphi)\mathrm{d}t$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T U_m I_m \cdot \frac{1}{2}[\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]\mathrm{d}t$$

其中第二项积分为零,所以

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{1}{2}U_m I_m \cos\varphi \mathrm{d}t = \frac{1}{2}U_m I_m \cos\varphi$$

$$= UI\cos\varphi \qquad (24-4)$$

平均功率不仅和电流、电压的有效值有关,并和功率因数 $\cos\varphi$ 有关.

由图 24－1 所示可知

$$P = UI\cos\varphi = U_R I \qquad (24-5)$$

故平均功率也就是电路中电阻上消耗的功率,也称有功功率. 由于电压与电流有效值的乘积称为总功率,也称视在功率 S,即

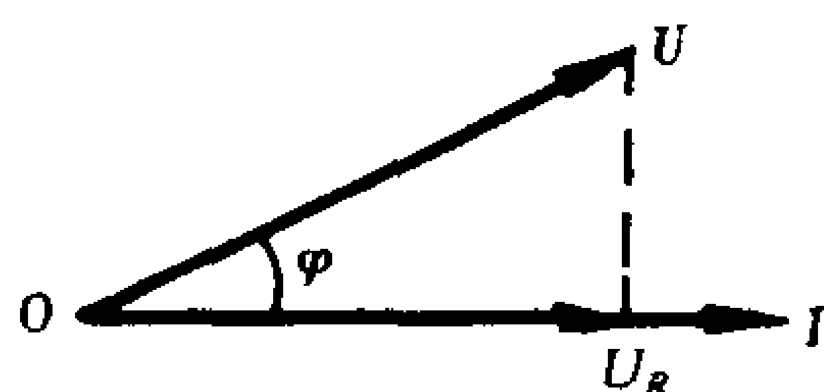


图 24－1

$$S = UI \qquad (24-6)$$

故

$$\frac{P}{S} = \frac{UI\cos\varphi}{UI} = \cos\varphi \qquad (24-7)$$

功率因数 $\cos\varphi$ 就是电源送给负载的有功功率 P 和总功率 S 的比值,它是反映电源利用率大小的物理量.

测量功率的方法很多,最常用的是瓦特表,此外示波器也可测量功率(示波器适用于测量高频情况下较小的功率).

二、瓦特表测量功率及功率因数

1. 瓦特表测功率

本实验采用电动型瓦特表,电动型瓦特表的测量机构示意图如图 24－2 所示.

电动型瓦特表内部测量机构有两个线圈,线圈 A 为固定线圈,它与负载串联而接入电路,通过固定线圈的电流就是负载电

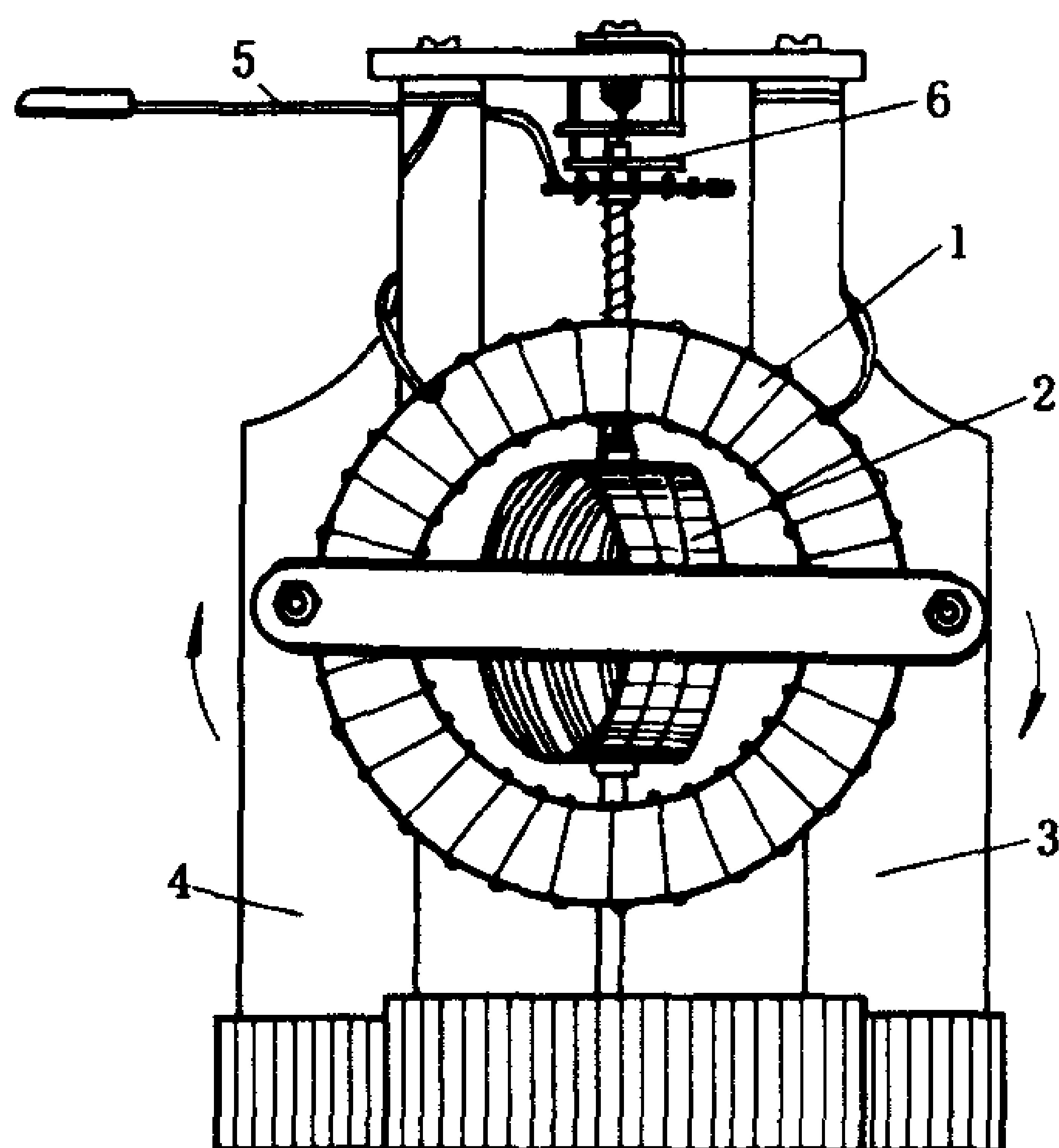


图 24－2　电动型仪表测量机构示意图

1. 固定线圈；2. 可动线圈；3、4. 支架；5. 指针；6. 游丝.

流，因此称固定线圈 A 为瓦特表的电流线圈；线圈 B 为动圈，线圈本身电阻很小，往往与扩程用的高电阻相串联，测量时与负载相并联，动圈支路两端的电压就是负载电压 U_l，因此动圈又称电压线圈，它与指针相连.

使用时电路联接见图 24－3(a)、(b)，负载小时瓦特表电流线圈外接，按图 24－3(a)连接；负载大时瓦特表电流线圈内接，按图 24－3(b)连线.

瓦特表能测量负载功率的原理[①]在于：电流通过固定的电流线圈产生接近均匀的固定磁场，电压支路的电流通过位于固定线圈中间的动圈 B 并使动圈产生偏转，偏转角的大小与流经瓦特表的电流、电压及二者之间相角的余弦乘积成正比，即与功率成正比，因而可借固定于动圈转轴上的指针直接指示功率值. 瓦特表

① 参阅附记一.

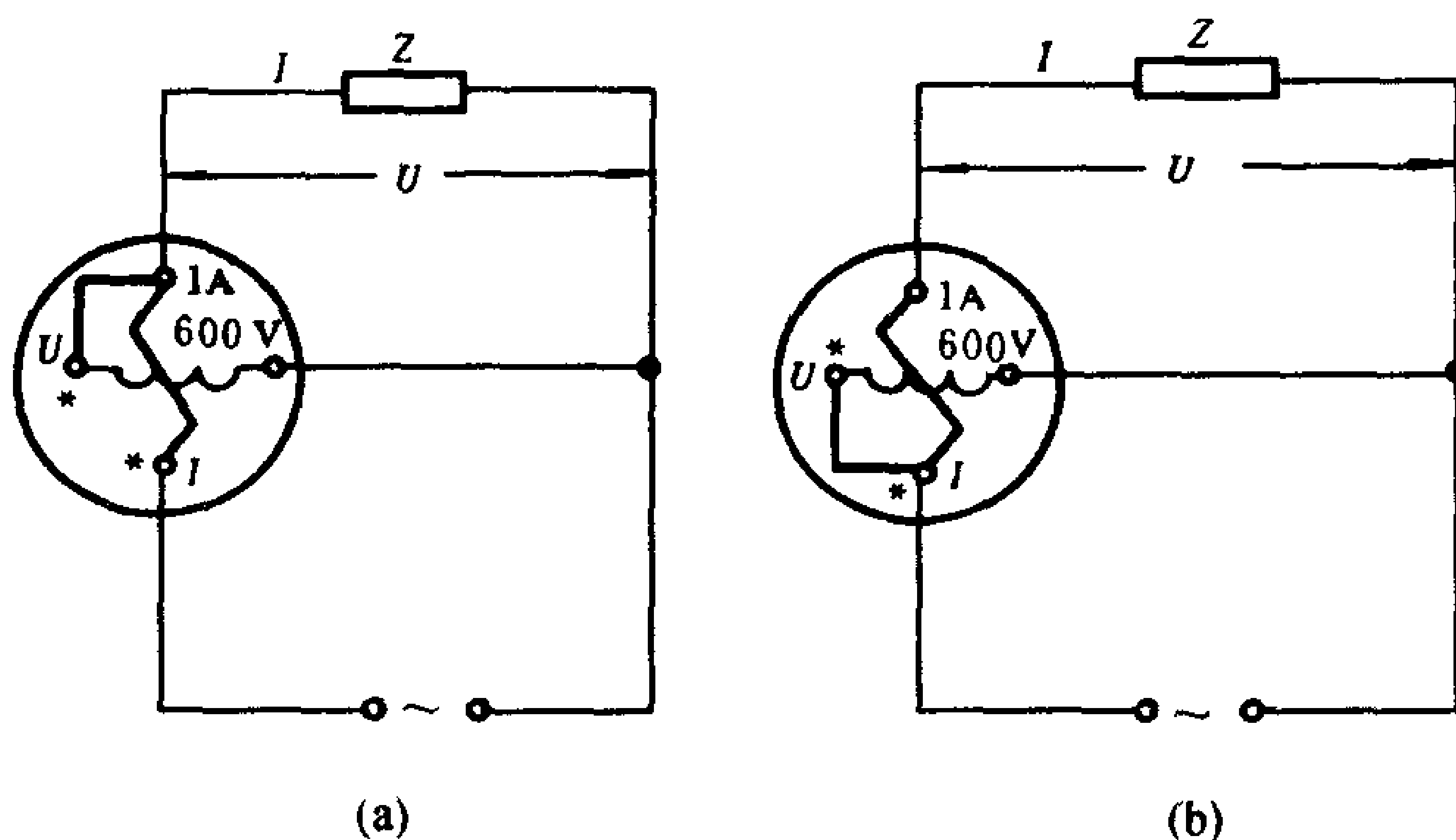


图 24－3　瓦特表接线图

的量程转换，由改变固定线圈的串联和并联及电压支路之附加扩程电阻来实现.

2. 功率因数的测定及提高功率因数的方法

根据 $P = IU\cos\varphi$ 可知，若用瓦特表测出它的功率，而用交流电压表与交流安培表同时测出它的电压、电流值则可求得功率因数：

$$\cos\varphi = \frac{P}{IU} \qquad (24-8)$$

一般用的电设备多数呈电感性的，这种电感性的负载造成功率因数的降低，当负载的端电压一定时，功率因数越低输电线路上的电流越大，导线上的压降也越大，因此导致电能损耗增加，传输效率降低. 要提高传输效率，必须提高功率因数. 解决的方法是在负载两端并联电容性负载. 如图 24－3 所示的负载若是电感性负载，通过它的电流 I_1 的相位落后于电压的相位，设两者的相位差为 φ_1，在未并联电容前 $I = I_1$，并联电容后电源供给的总电流 I 变为 $I = I_1 + I_2$，由于负载的电压 U 不变，则电流 I_1 的大小和相位 φ_1 不变，通过电容的电流 I_2 超前负载两端的电压 $\frac{\pi}{2}$，如图 24

-4 所示.

从矢量图可以清楚看出,总电流减少了,并且它与电压之间的相位差也减少了,因而总的功率因数 cos φ 得到了提高. 而提高功率因数可以提高电源的有功功率.

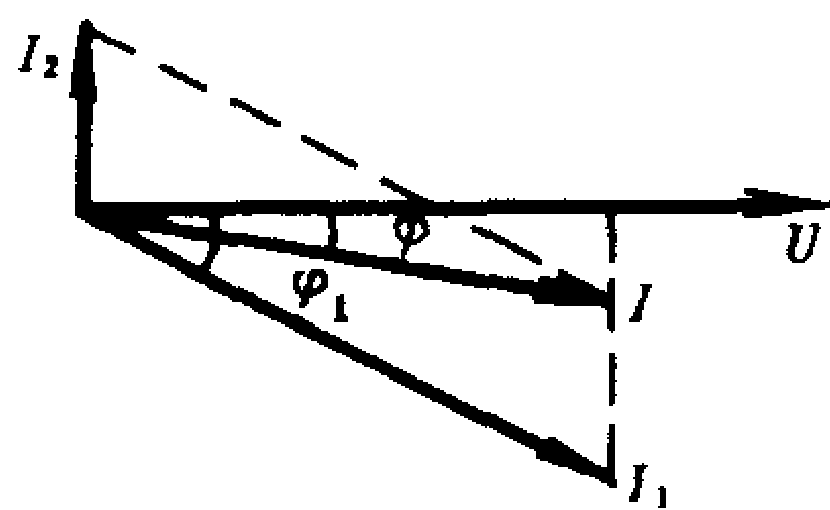


图 24-4

3. 使用瓦特表的注意事项

(1) 必须正确接线——一定要遵守"发电机端"的接线规则.

从瓦特表的工作原理可知,瓦特表有两个独立支路. 为了使接线不致发生错误,通常在电流支路的一端(简称电流端) 和电压支路的一端(简称电压端)标有" * "," ± "或" ↑ "等特殊标记,一般称它们为"发电机端". 瓦特表正确接线规则如下:

① 瓦特表标有" * "号的电流端钮(即电流线圈的"发电机端")必须接至电源的一端,而另一电流端钮则接负载端. 电流线圈是串联接入电路中的.

② 瓦特表中标有" * "号的电压端钮可以接至电源端的任一端,但必须注意电流、电压发电机端钮(即标有" * "的两个端钮)一定要接到电源同一侧,而另一个电压端钮则跨接到负载的另一端. 瓦特表的电压支路是并联接入电路的,否则电表指针反转.

③ 瓦特表在工作时 I、U、P 都不能超过它们的量程,否则易烧坏仪表.

(2) 使用时,仪表水平放置,并尽可能远离强电流导线或强磁场地点,以免使仪表产生附加误差.

(3) 如果瓦特表的接线正确,但发现指针反转(例如:负载含有电源反过来向外输出功率),则可以改变仪表上装有的"换向开关",它只改变电压线圈中电流的方向,不改变电压线圈与扩程电阻的相对位置,即不改变电压支路原来的接线位置.

(4) 由于电源电压较高、必须注意人身安全与仪器的安全,改

接电路必须将调压变压器调至“零”点，并且断开电源，手切勿触及金属部分.

本实验采用电感性负载、功率因数较低，故采用低功率因数瓦特表(D34－W 型额定电流为 0.5A 和 1 A,额定电压为 150 V、300 V、600 V,功率因数为 0.2).

瓦特表的正确读数：

瓦特表的标度尺只标有分格数，而并不标明瓦特数，这是由于瓦特表一般是多量限的，在选用不同电流量限和电压量限时，每一分格都代表不同的瓦特数，每一格所代表的瓦特数称为瓦特表的分格常量，可按下式计算瓦特表分格常量：

$$c = \frac{U_m I_m \cos \varphi}{\alpha_m}\text{(单位为瓦每格)} \qquad (24-9)$$

式中：U_m——所使用瓦特表的电压额定值；

I_m——所使用瓦特表的电流额定值；

$\cos \varphi$——在额定电流、额定电压下能使指针满刻度的额定功率因数. $\cos \varphi$ 值在面板上标明，例如 D34－W 型瓦特表 $\cos \varphi = 0.2$；

α_m——瓦特表指针最大偏转所指示的格数.

在测量时，读得瓦特表的偏转格数后乘上瓦特表相应的分格常量，就等于被测功率的数值：

$$P = c\alpha\text{(单位为瓦)} \qquad (24-10)$$

式中：P——被测功率的瓦特数；

c——瓦特表分格常量；

α——瓦特表指针偏转指示格数.

普通用的瓦特表的使用、测量与计算方法和上完全相同，所不同的是以上计算公式中 $\cos \varphi = 1$.

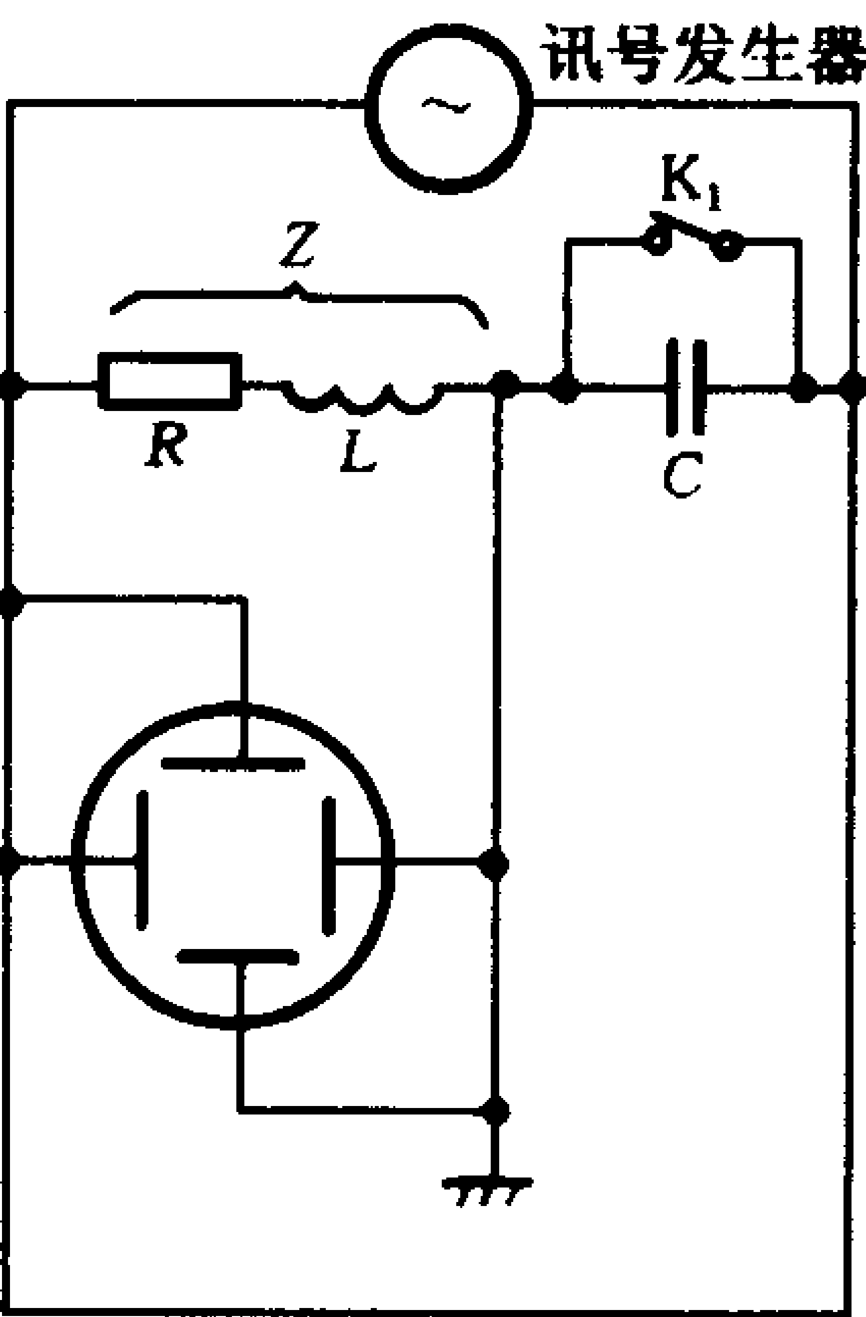
三、用示波器测量功率和功率因数

用示波器测量功率的原理在于：负载上所消耗的有功功率的

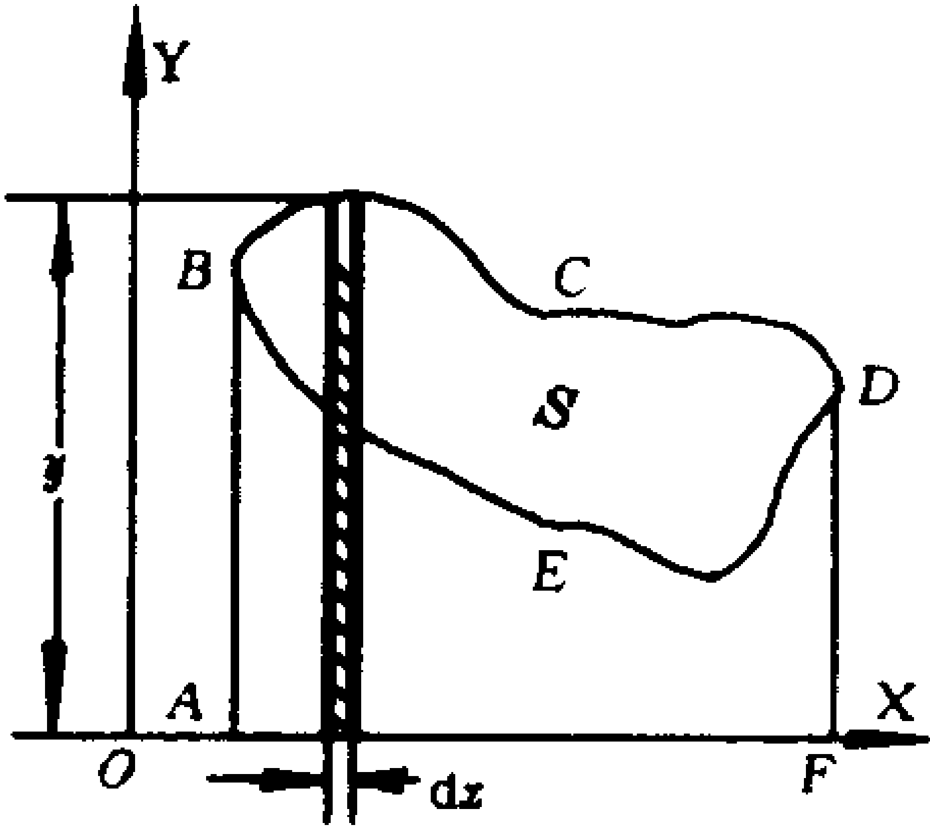
数值正比于示波器荧光屏上显示的闭合回线的面积.

用示波器测功率的优点在于:可以适用较高频率、正弦和非正弦电压的情况;同时用示波器可以测量到小至 10^{-3}W 的微小功率,这些优点是瓦特表所没有的.

测量电路如图 24－5(a)所示.



(a)



(b)

图 24－5

负载 Z 上的电压接至 Y 轴,电容 C 上的电压接至 X 轴,通常负载上的电压是给定的,于是在荧光屏上出现了一个闭合曲线,如图 24－5(b)所示,它是电源电压变化一周所描绘出来的,我们取 x, y 坐标,回线的面积为 S,负载上消耗的功率为 P:

$$P = \frac{SCf^{①}}{K_X \cdot K_Y} \qquad (24-11)$$

K_X 与 K_Y 分别为示波器的 X 轴

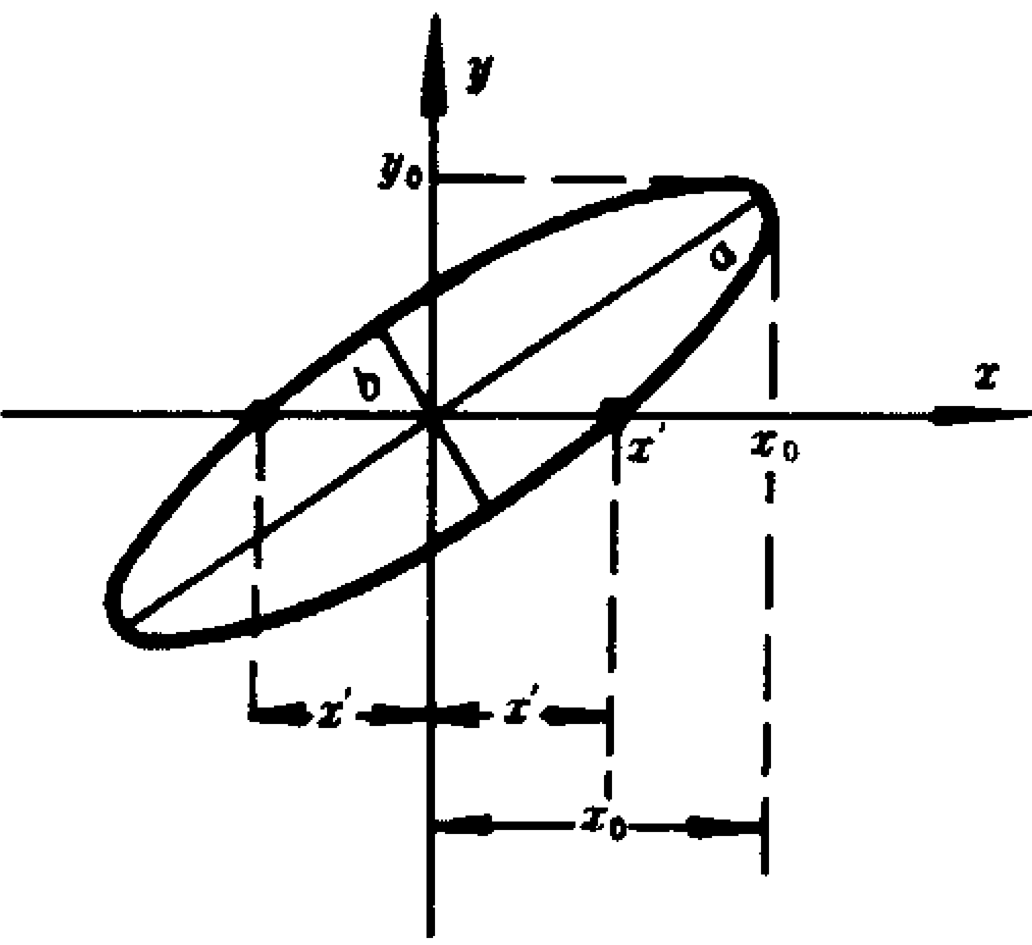


图 24－6

① 参阅附记三.

和 Y 轴的电压常量，它等于偏转板上加 1 V 电压时，光点沿 x 或 y 方向的移动距离. f 为频率.

当讯号电压为正弦讯号时，图形为一椭圆，设椭圆长半轴为 a 短半轴为 b，则面积 $S=\pi ab$，所以

$$P = \frac{\pi abCf}{K_X \cdot K_Y} \tag{24-12}$$

测出椭圆与 x 轴交点的横坐标 x' 和光点的最大的横坐标 x_0，就可算出功率因数

$$\cos\varphi = \left|\frac{x'}{x_0}\right| \tag{24-13}$$

实验内容

一、用瓦特表测量功率和功率因数

1. 电路按图 24－7 接线，L 为铁芯电感(40 W 日光灯的镇流器)，R 为变阻器的全电阻值($R=300\ \Omega$ 左右). R、L 的串联电路作为负载. 先不并联电容，测出 RL 电路的功率 P、负载的端电压和流过负载的电流值，按(24－8)式求得功率因数 $\cos\varphi$.

2. 用整流式交流电压表测出电感上的电压 U'_L 和电阻上的电压 U_R 值. 预先测出电感的电阻 R_L 值，计算 U_{R_L} 值($U_{R_L}=I_1R_L$). 根据 U_{R_L} 与 U'_L 的矢量关系，作图定出 U_L 的大小. 如图 24－8 所示.

由图可知

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_{R+R_L}} = \frac{U_L}{U_R + U_{R_L}} = \frac{\omega L}{R + R_L}$$

由计算的 φ 值与瓦特表所测得的 φ 值加以比较，求出它们的相对误差.

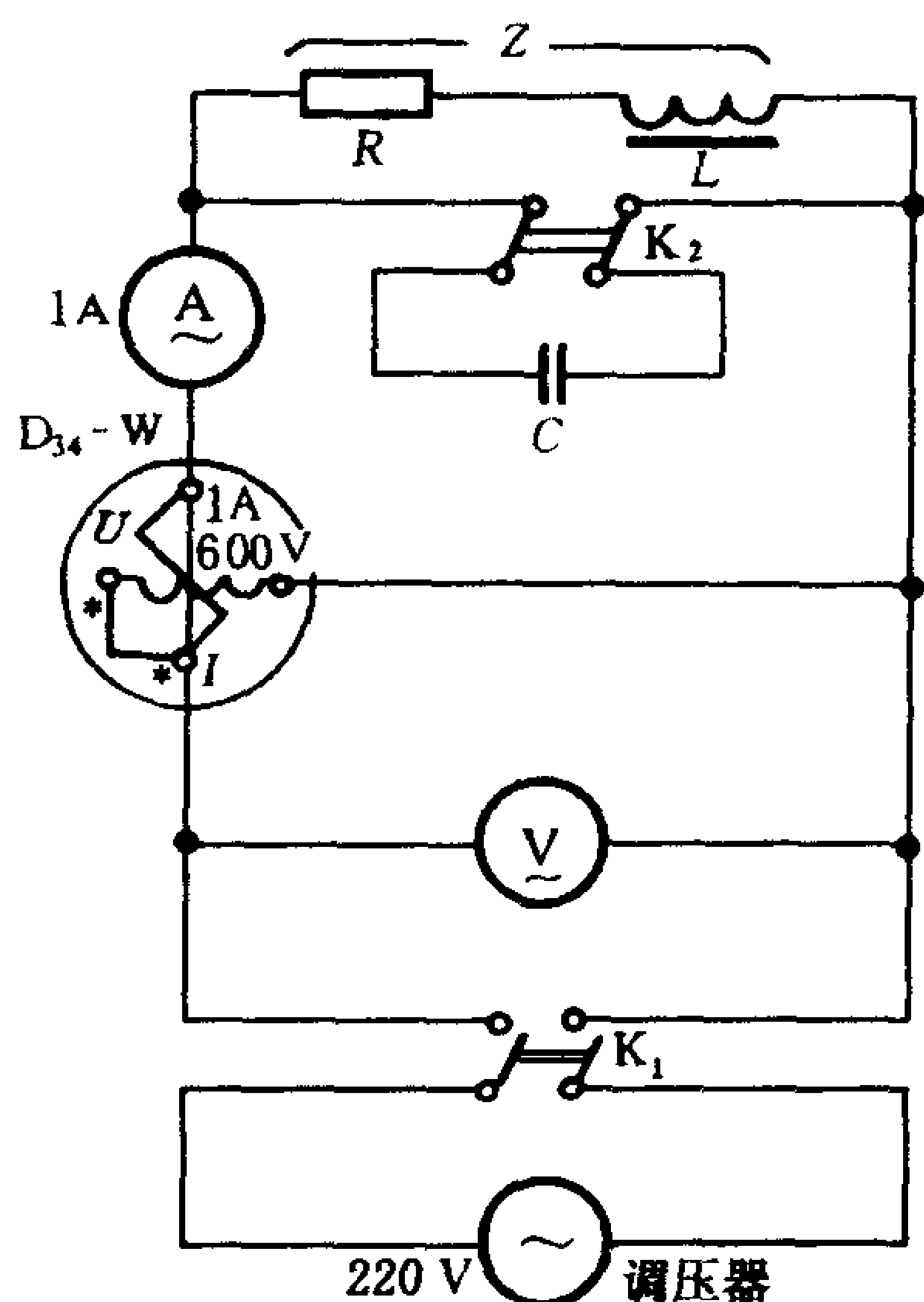


图 24－7

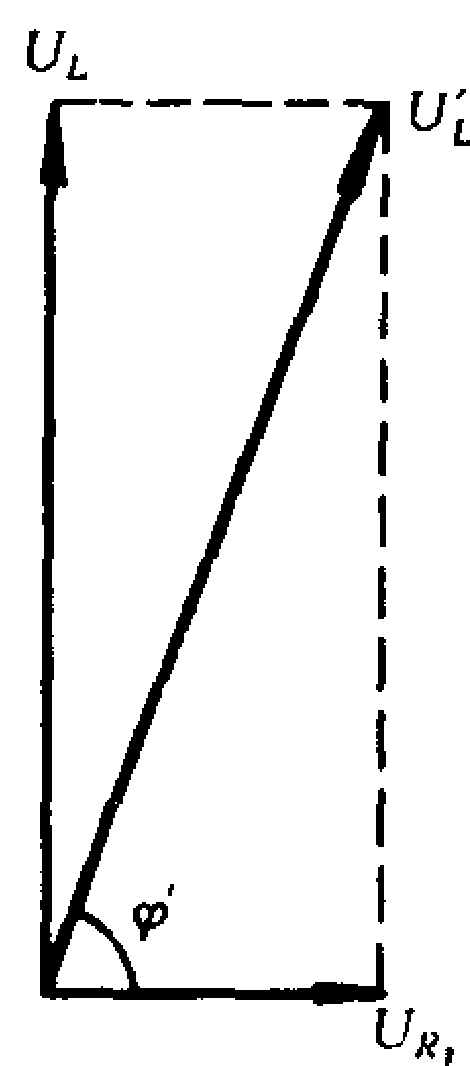


图 24－8

3. 在负载两端分别并联 1 μF、2 μF、3 μF、4 μF、5 μF、6 μF、10 μF、12 μF 的电容，并记下各对应的电压、电流、功率值，分别计算并找出功率因数最高的电容值. 按 $C_0 = \dfrac{L}{(R+R_L)^2+(\omega L)^2}$ ①求出使功率因数等于 1 的电容值 C_0. 在负载上并联数值等于 C_0 的电容，以同样方法测出它的功率因数，并与计算值进行比较，求其相对误差.

注意：每次更换电容时，必须将调压器电压调至 0，再将 K_1、K_2 断开，并将电容器两端短路放电后再更换电容.

二、用示波器测量功率和功率因数

电路按图 24－5(a)接线，把 RL 串联电路作为负载 Z，电源用

① 参阅附记二.

音频讯号发生器：$C = 4\ \mu F$，频率 $f = 50$ Hz，输出电压 $U = 5.00$ V.

先将 K_1 开关短接，使电容短路，输出电压调至 5.00 V，记下示波器 y 轴的偏转格数 y_0，然后断开 K_1，将电容接入电路，调节音频振荡器的电压输出，使 y 轴的偏转格数仍保持 y_0 值，调节示波器使椭圆图形位于对称中心位置，测量椭圆长半轴 a、短半轴 b、光点最大的横坐标 x_0 和椭圆与 x 轴的交点坐标 x'，用交流电压档测量 U_x 和 U_y，光点最大纵坐标之间的距离 $2y_0$（它表示两个峰－峰值的大小）.

故
$$K_Y = \frac{2\sqrt{2}U_y}{2y_0} = \frac{\sqrt{2}U_y}{y_0}$$

同理可得
$$K_X = \frac{2\sqrt{2}U_x}{2x_0} = \frac{\sqrt{2}U_x}{x_0}$$

由测得的值代入(24－12)式可得 P 值.

由测得的 x_0 与 x' 值则可求得功率因数 $\cos\varphi$ 值.

预习思考题

1. 为什么瓦特计要按负载大小选择图 24－3(a)或(b)的不同接法，它和伏安法测电阻的接法有否相似之处？

2. 为什么提高功率因数要在 RL 负载两端并联一电容？是否并联任何电容值均能提高功率因数？

3. 试指出 D34－W 型低功率因数瓦特表当额定电流分别为 0.5 A、1 A，额定电压分别为 150 V、300 V、600 V 满量程时对应的功率值，各档的功率分格常量各为多少？

4. 如何用示波器测量功率与功率因数？

复习思考题

1. 试画出功率表正确接线图.

2. 瓦特表的电流、电压发电机端钮一定要接到电源同一侧，若不接到电

源同一侧将产生怎样的结果?

3. 试分析实验误差的由来?

4. 试画出提高日光灯电路功率因数的测试电路图并写出测试步骤.

[附记一]

电动型瓦特表测量功率的工作原理

设负载两端电压 $U(t)=U_m\sin\omega t$,通过的电流 $I(t)=I_m\sin(\omega t+\varphi)$,这时通过固定线圈(即电流线圈)的电流 I_1 等于负载电流 I,即

$$I_1 = I$$

而通过动圈(即电压线圈)的电流 I_2 与动圈电压 U 成正比:

$$I_2 = \frac{U}{Z_U}$$

式中 Z_U 为电压线圈支路的总阻抗,因为动圈感抗 $\omega L_U \ll R'$(R' 为动圈的电阻加扩程电阻),动圈感抗可不计,故 R' 近似等于 Z_U 值. 则电压线圈中的电流 I_2 与端电压 U 同相.

从图 24-9 所示的矢量图可以看出这时瓦特表两线的电流 I_1 和 I_2 之间的相位差角 ψ 就等于负载两端电压 U 与电流 I 之间的相位差角 φ:

$$\psi = \varphi \qquad (24-14)$$

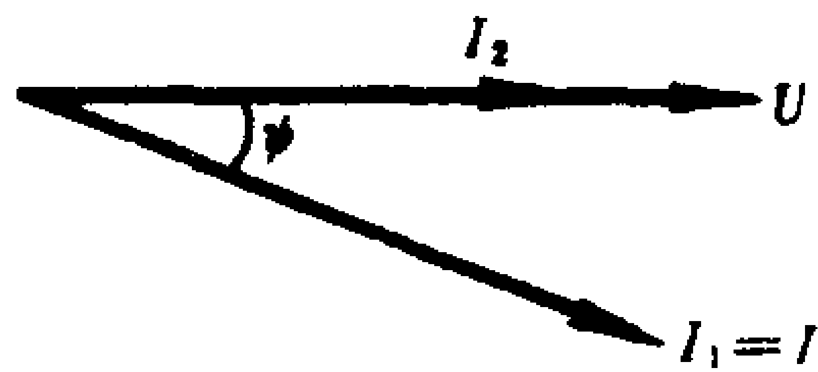


图 24-9

可动线圈所受力矩与两个线圈的电流乘积成正比,故某一时刻所受的力矩为

$$M(t) = KI_1(t)\cdot I_2(t) = KI(t)\cdot\frac{U(t)}{R'}$$

$$= KI_m U_m \frac{1}{R'}\sin\omega t\ \sin(\omega t+\psi)$$

$$= \frac{K}{R'} I_m U_m \cdot \frac{1}{2} [\cos \psi - \cos(2\omega t + \psi)]$$

$$= \frac{K}{R'} IU \cos \psi - \frac{K}{R'} IU \cos(2\omega t + \psi) \qquad (24-15)$$

该式中第一项为常数项,不随时间变化,因为任一个正弦量或余弦量在一个周期内的平均值为零,因此力矩在一个周期内的平均值等于第一项,即平均力矩为

$$M_p = \frac{K}{R'} IU \cos \psi$$

由式(24-14)可知 $\psi = \varphi$,故

$$M_p = \frac{K}{R'} IU \cos \varphi = K_1 P \qquad (24-16)$$

反抗力矩由游丝产生,它与转角成正比,即

$$M_\alpha = K_2 \alpha$$

当 $M_p = M_\alpha$ 时,指针静止在 α 角上,则

$$\alpha = \frac{K_1}{K_2} IU \cos \varphi = \frac{K_1}{K_2} P = K_p P \qquad (24-17)$$

式中

$$K_p = \frac{K_1}{K_2} \text{ 为一常量.}$$

综上所述,在交流电路中,电动型瓦特表的偏转角 α 与交流电路有功功率 P 成正比. 这个结论虽然是在正弦交流电路的情况下得出来的,但对非正弦交流电路同样也是适用的. 故电动型瓦特表不仅可以用来测量直流电路的功率,也可以用来测量正弦和非正弦交流电路的功率.

[附记二]

计算功率因数由 $\cos \varphi_1$,提高为 $\cos \varphi$ 所需的电容器的电容量.

从图 24-4 可知

$$I_1\cos\varphi_1 = I\cos\varphi = \frac{P}{U} \qquad (24-18)$$

$$I_2 = I_1\sin\varphi_1 - I\sin\varphi = I_1\cos\varphi_1\cdot\mathrm{tg}\,\varphi_1 - I\cos\varphi\cdot\mathrm{tg}\varphi$$

$$= \frac{P}{U}(\mathrm{tg}\,\varphi_1 - \mathrm{tg}\,\varphi)$$

又因 $I_2 = U\cdot\omega C$，代入上式得

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\mathrm{tg}\,\varphi_1 - \mathrm{tg}\,\varphi) \qquad (24-19)$$

若功率因数提高到最大功率因数（即 $\cos\varphi = 1, \varphi = 0, \mathrm{tg}\,\varphi = 0$），所需并联电容值为

$$C = \frac{P}{\omega U^2}\mathrm{tg}\,\varphi_1 \qquad (24-20)$$

由图 24－10 可知

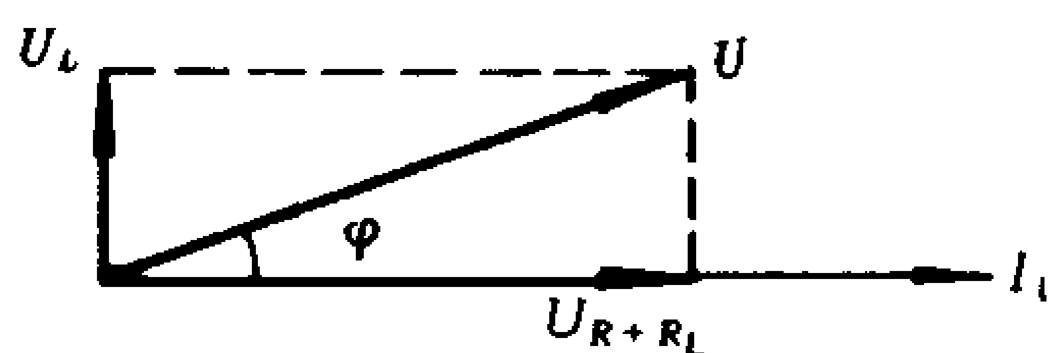


图 24－10

$$\mathrm{tg}\varphi_1 = \frac{U_L}{U_{R+R_L}} = \frac{U_L}{U_R + U_{R_L}} = \frac{I\omega L}{I(R+R_L)} = \frac{\omega L}{R+R_L} \qquad (24-21)$$

而

$$P = I_1^2(R+R_L)$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R+R_L)^2 + (\omega L)^2}}$$

代入上式

$$C_0 = \frac{\left(\dfrac{U}{\sqrt{(R+R_L)^2+(\omega L)^2}}\right)^2\cdot(R+R_L)}{\omega U^2}\cdot\frac{\omega L}{R+R_L}$$

$$= \frac{L}{(R+R_L)^2+(\omega L)^2} \qquad (24-22)$$

当负载两端电压为 U,并满足上式的电容值 C_0 时,则功率因数 $\cos\varphi=1$,提高功率因数就可以提高电源中的有功功率.

[附记三]

关于 $P=\dfrac{SCf}{K_X\cdot K_Y}$ 的证明

取单元面积 $\mathrm{d}S=y\mathrm{d}x$,

$$y=K_YU$$

式中,y 为负载电压在荧光屏上对应的垂直偏转距离. K_Y 为示波器 y 轴的电压常量(即在 Y 偏转板上加 1 V 电压光点在 y 方向所移动的距离). U 为负载上的电压. 若示波器 x 轴的电压常量为 K_X,电容上电压为 U_C,则电子射线在 x 轴的偏转为

$$x=K_XU_C$$

而

$$U_C=\frac{1}{C}\int_0^T i\mathrm{d}t$$

则

$$\mathrm{d}x=\frac{K_X}{C}i\mathrm{d}t$$

电源电压在一周描绘的闭合曲线的面积为

$$S=\int_0^T\mathrm{d}S=\int_0^T y\mathrm{d}x=\int_0^T K_YU\cdot\frac{K_X}{C}i\mathrm{d}t=\frac{K_XK_Y}{C}\int_0^T Ui\mathrm{d}t$$

而

$$\int_0^T Ui\mathrm{d}t=P\cdot\frac{1}{f}=PT$$

则

$$S=\frac{K_X\cdot K_Y}{C}\cdot PT$$

故负载上所消耗的功率为

$$P=\frac{SCf}{K_X\cdot K_Y}\qquad(24-23)$$

从(24－20)式可知被测功率正比于示波器荧光屏显示的闭合曲线所包围的面积,对被测功率的测量也就是对此面积的确定.

实验二十五　交流电桥

目的

1. 用交流电桥测量电感和电容及其损耗；
2. 了解电桥平衡的原理，掌握调节平衡的方法.

仪器和用具

电阻箱、晶体管繁用表(交流电流表)、音频信号发生器、标准可变电容箱、标准电感、待测电容和待测线圈.

原理

交流电桥主要用来测量电容器的电容量和线圈的电感量，它是电感、电容测量中精确的测量仪器.

1. 实际电容器和线圈的等效线路

电容器总是由两个互相"绝缘"的极板组成，为了提高它的电容量，在极板间充有各种不同介电常数的电介质，但是各种电介质的绝缘性能不一，因此实际使用的电容器两极板间还相当于并联着一只阻值较大的绝缘电阻. 如图25-1所示，左边为实际电容器，等效成右边的理想电容 C 与绝缘电阻 R_1 并联的组合件。只有当 R_1 值趋于无限大，实际电容器与理想电容器才完全等效，因此电容器的"容抗"①应写作

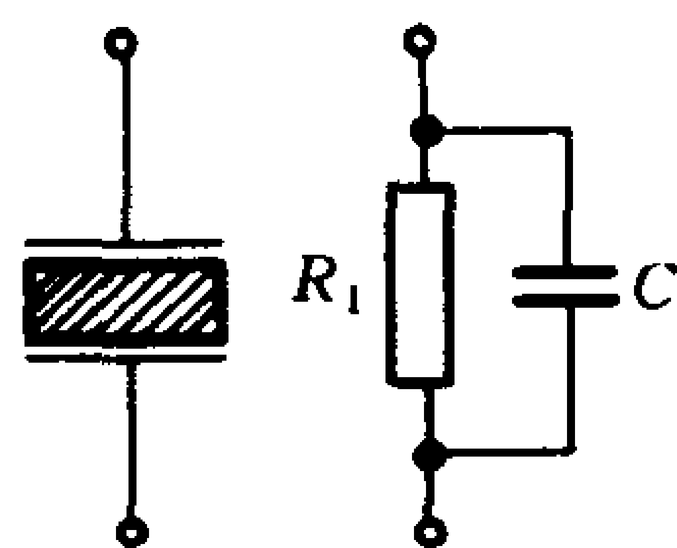


图25-1　实际电容器等效线路

① 严格地说应称为电容器的"阻抗".

$$Z_C = R_1 // \frac{1}{C\omega j} = \frac{R_1 \frac{1}{C\omega j}}{R_1 + \frac{1}{C\omega j}} = \frac{R_1(1 - R_1 C\omega j)}{1 + (R_1 C\omega)^2}$$

(25 - 1)

当绝缘电阻远大于纯容抗时，

$$Z_C = \frac{1}{R_1(C\omega)^2} + \frac{1}{C\omega j} = R_2 + \frac{1}{C\omega j}$$

式中

$$R_2 = \frac{1}{R_1(C\omega)^2} \quad (25 - 2)$$

根据上述结果实际电容器又等效成理想电容器 C 与电阻 R_2 串联而成的 R_2C 电路，R_2 值可根据(25－2)式计算出来，由于 R_1 远大于 $\frac{1}{C\omega}$，因此 R_2 值很小，并趋于零，理想电容器的 $R_1 \to \infty$，或者 $R_2 \to 0$. 由于实际电容器不完全理想，所以正弦交流电通过它时，电容两端的电压与通过的电流之间相位差 φ 不是 90°，而是 $\varphi = 90° - \delta$. δ 称为电容器的损耗角，φ 就是实际电容器端电压与电流间的相位差. 如图 25－2 所示，损耗角 δ 随 R_2 的增加而变大，离纯电容或者理想电容的特性越远，因此 δ 是衡量实际电容器与理想电容器差别的一个重要参数. 为了方便，还用损耗角的正切来衡量实际电容器的质量，称为损耗，

$$\text{tg}\,\delta = R_2 C\omega \quad (25 - 3)$$

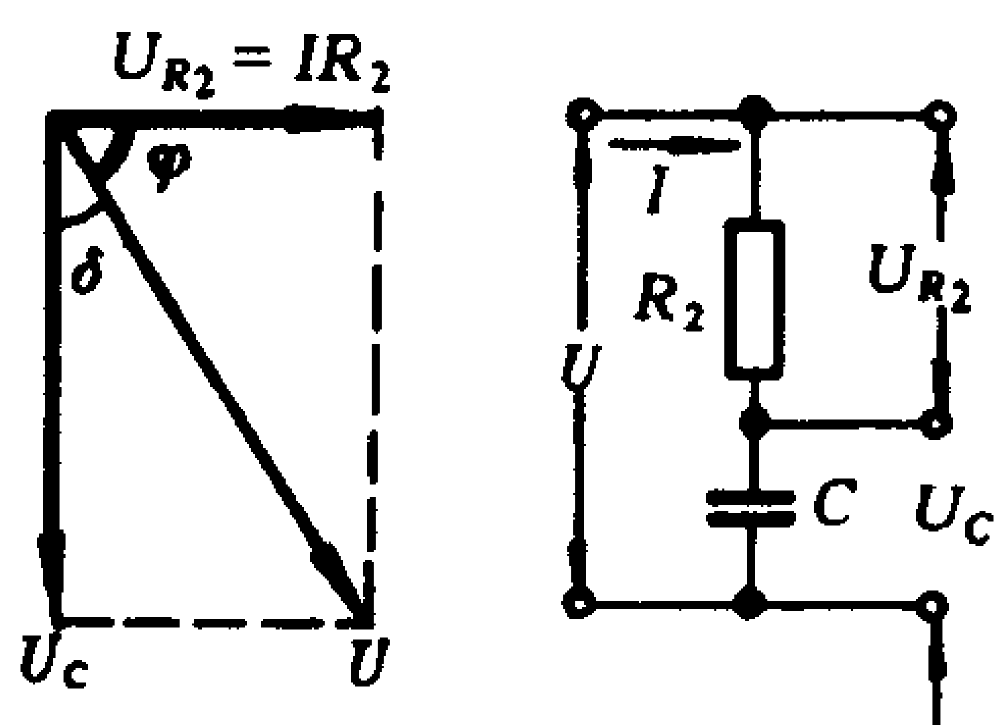


图 25－2 电容器的损耗角

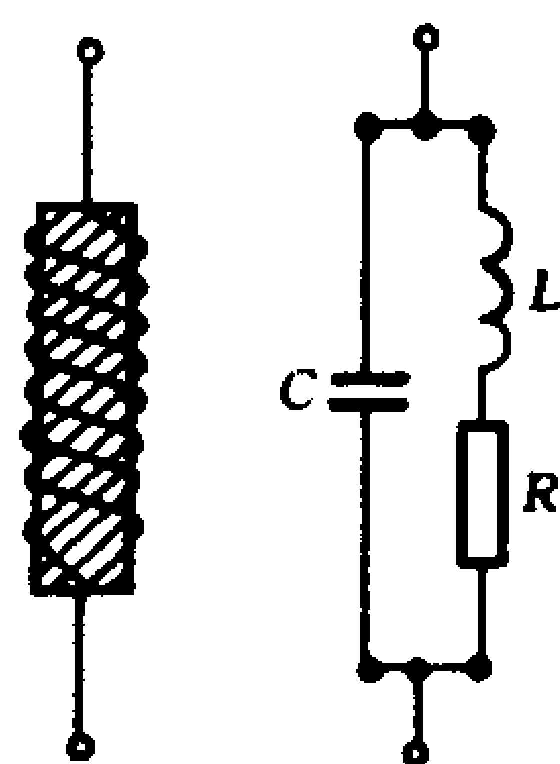


图 25－3 实际线圈等效线路

电感是由导线按一定方式绕制而成的线圈，因此它具有导线

的电阻、由导线相对位置决定的分布电容以及线圈本身决定的电感量．它可等效于一个 L、R、C 串并联电路，如图 25－3 所示．图中 C 为实际线圈的"分布"电容，其值很小．对高频交流电有较大的傍路作用，L 为纯电感线圈或称为理想线圈，R 为线圈的直流电阻和由其他影响合成的串联电阻．如果线圈工作在低频（约几百千赫）范围内，便可略去 C，而仅考虑线圈的直流电阻，于是感抗可表示为

$$Z_L = R + L\omega \mathrm{j} \tag{25-4}$$

R 越小，线圈越近纯电感．为了衡量线圈的质量，用品质因数 Q 来定量描述，

$$Q = \frac{L\omega}{R} \tag{25-5}$$

2．交流电桥的平衡条件

用交流电桥可以测量电容、电感和它们的损耗以及品质因数．交流电桥的线路形式和方法要旨与直流电桥相同，见图 25－4，但有几点需要说明：交流电桥采用交流电源(S)，频率应选用被测元件的工作频率；其次，示零器(G)采用高灵敏度的交流电流表或者示波器、耳机等交流电流（或者交流电压）指示仪表，而不能采用像灵敏检流计那样的直流电表；再次，桥臂中各元件在交流电桥中不都是电阻，可以是标准电感、标准电容或者 LRC 的组合回路等．

由于交流电桥中含有交流电源以及线圈和电容等元件，因此电桥的平衡条件（$\widetilde{U}_B = \widetilde{U}_D$）就是两个复数相等的条件，例如 B、D 两点，不单 $U_B = U_D$（幅度相等），还必须 $\varphi_B = \varphi_D$（相位相同）．根据分压的原理，当示零器(G)未接上时，有关系式

$$\widetilde{U}_B = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}\widetilde{U}_S \quad 和 \quad \widetilde{U}_D = \frac{Z_3}{Z_4 + Z_3}\widetilde{U}_S$$

因此 B 和 D 两点的电势差为

$$\widetilde{U}_B - \widetilde{U}_D = \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_4 + Z_3}\right)\widetilde{U}_S$$

$$= \frac{Z_2Z_4 - Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_4 + Z_3)}\widetilde{U}_S \qquad (25-6)$$

当电桥平衡时，

$$Z_2Z_4 - Z_1Z_3 = 0$$

移项整理后，

$$Z_1 = \frac{Z_4}{Z_3}Z_2 \qquad (25-7)$$

3. 电容电桥

若待测电容接在 AB 臂，并写成 $Z_1 = R_x + \frac{1}{C_x\omega j}$ 的形式，取 $Z_4 = R_4$，$Z_3 = R_3$（都是纯电阻①），根据复数相等条件取 $Z_2 = R_2 + R_{C_2} + \frac{1}{C_2\omega j}$，式中 R_2 也是纯电阻，C_2 为标准电容，它的串联损耗电阻为 R_{C_2}，如果 C_2 是空气型标准电容或者云母型标准电容，工作在较低频率的条件下，那么，R_{C_2} 值极小可以不计，因此测量未知电容量可用图 25－5 的桥式线路，当电桥平衡时，由(25－7)式可知，

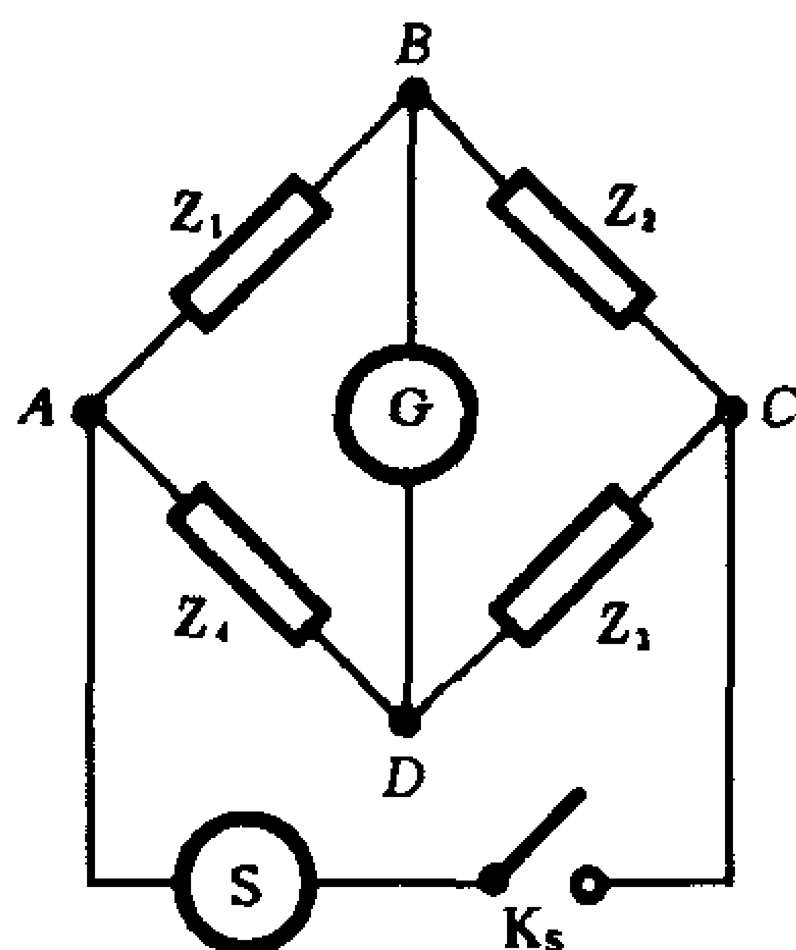


图 25－4　电桥线路

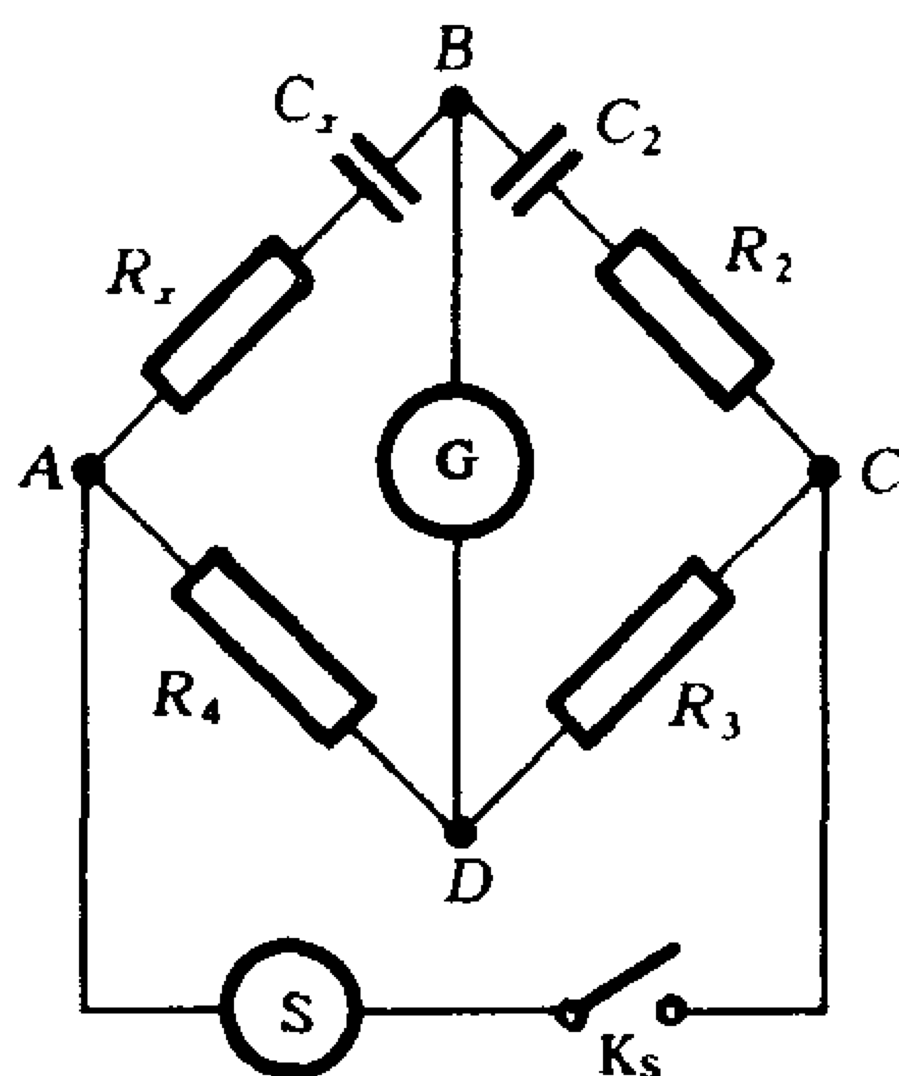


图 25－5　电容电桥

① 纯电阻就是电感量、电容量都等于零的电阻.

$$R_x + \frac{1}{C_x\omega j} = \frac{R_4}{R_3}\left(R_2 + \frac{1}{C_2\omega j}\right)$$

根据复数相等的条件可以得到

$$C_x = \frac{R_3}{R_4}C_2 \tag{25-8}$$

$$R_x = \frac{R_4}{R_3}R_2 \tag{25-9}$$

$$\text{tg}\,\delta = R_xC_x\omega = R_2C_2\omega \tag{25-10}$$

为了使电桥平衡,可分别重复调节 C_2 和 R_2 的数值,直到交流示零器指示的数值不能再小为止. 一般情况下我们注意的是要精确测量待测电容的容量大小,而损耗电阻或损耗(角)的有效数字不去过多追求,所以务必使 $R_3 = R_4$, $C_2 = C_x$,同时 R_3、R_4 和 C_2 的精确度要求尽可能高,而 R_2 的精确度则在可能范围内提高,处于第二位.

4. 西林电桥

根据交流电桥平衡的条件,利用(25-7)式来测量 C_x 和 R_x 的形式不是唯一的,若取 $Z_2 = R_2$, $Z_3 = R_3 /\!/ \frac{1}{C_3\omega j}$,以及 $Z_4 = \frac{1}{C_4\omega j}$,并且不计各个标准电容的损耗电阻,则关系式

$$R_x + \frac{1}{C_x\omega j} = \frac{\frac{1}{C_4\omega j}}{R_3 /\!/ \frac{1}{C_3\omega j}}R_2 \tag{25-11}$$

成立. 化简上式可以得到

$$C_x = \frac{R_3}{R_2}C_4 \tag{25-12}$$

$$R_x = \frac{C_3}{C_4}R_2 \tag{25-13}$$

$$\text{tg}\,\delta = R_3C_3\omega \tag{25-14}$$

这样的电桥如图 25-6 所示,称为西林电容电桥.

为了使电桥平衡可分别重复调节 C_3 和 R_3 的数值，尽可能使 $R_2 = R_3$，$C_4 = C_x$，并适当调节信号的输出幅度，保证标准电容[①] C_4 的有效数字不少于四位.

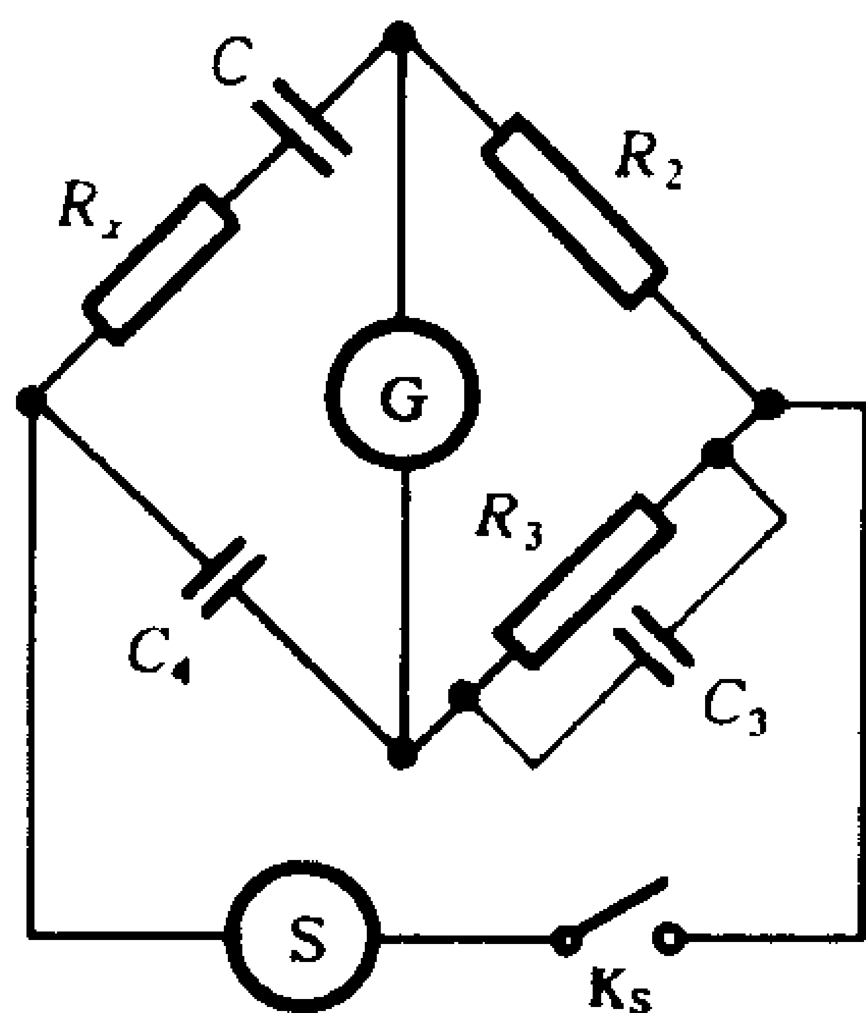


图 25-6 西林电桥

5. 电感电桥

若待测线圈接在 AB 臂，则 $Z_1 = R_x + L_x\omega\mathrm{j}$，取 $Z_3 = R_3$、$Z_4 = R_4$（即 Z_3 和 Z_4 是纯电阻），$Z_2 = R_2 + L_2\omega\mathrm{j}$（即标准电感），$R_2$ 和 L_2 分别是它的损耗电阻和电感量. 根据电桥平衡的条件，

$$R_x + L_x\omega\mathrm{j} = \frac{R_4}{R_3}(R_2 + L_2\omega\mathrm{j})$$

化简后得到

$$L_x = \frac{R_4}{R_3}L_2 \qquad (25-15)$$

$$R_x = \frac{R_4}{R_3}R_2 \qquad (25-16)$$

$$Q = \frac{L_x\omega}{R_x} = \frac{L_2\omega}{R_2} \qquad (25-17)$$

测量电感的电桥线路如图 25-7 所示. 由于 R_2 是不能改变的，所以只有 L_2、R_4/R_3 值选得正确才能使(25-15)和(25-16)式成立，因此分别重复调节 L_2 和 R_4/R_3 值，最后达到电桥平衡. 如果采用图 25-8 的可变自感比较电桥，可以改变 R_2 或者 R_x 的值，因此电桥平衡的调节速度可进一步提高. 当 $R_x < R_2$ 时，可将 R' 与 R_x 串联，反之与 R_2 串联. R_2 和 R_x 值先用欧姆表估测. 图中选择开关 K_G 所接的位置要根据 R_x、R_2 值确定，当 K_G 与 1 接通时，

---

① 参见附记.

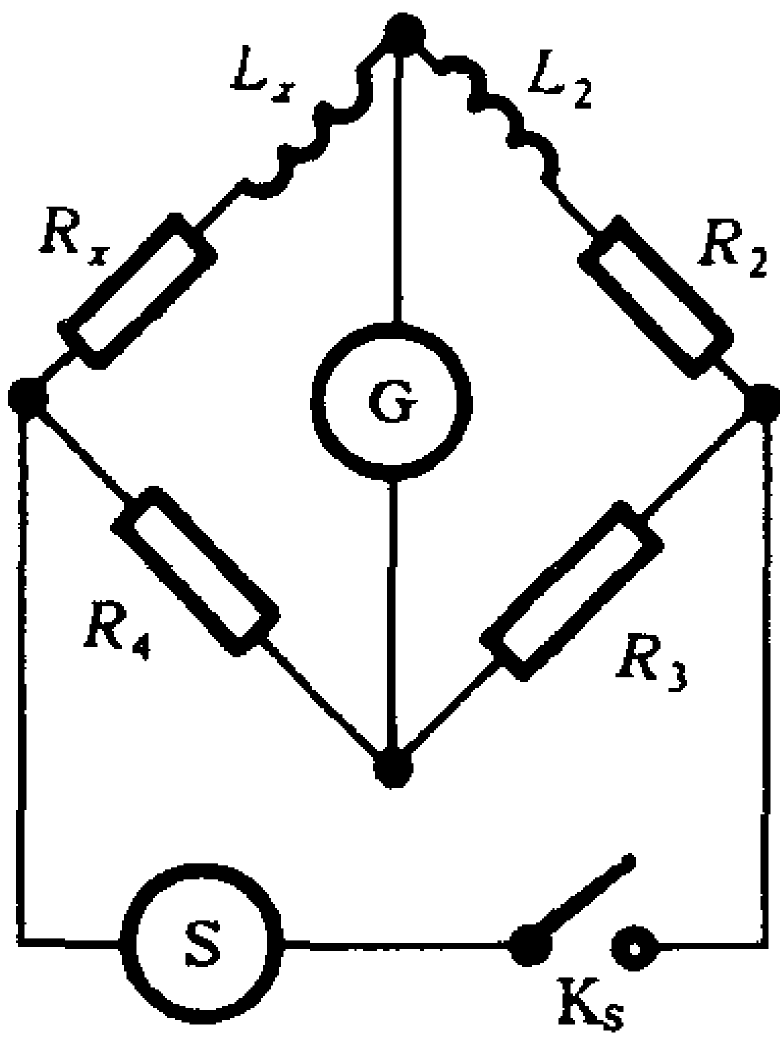


图 25－7　电感比较电桥

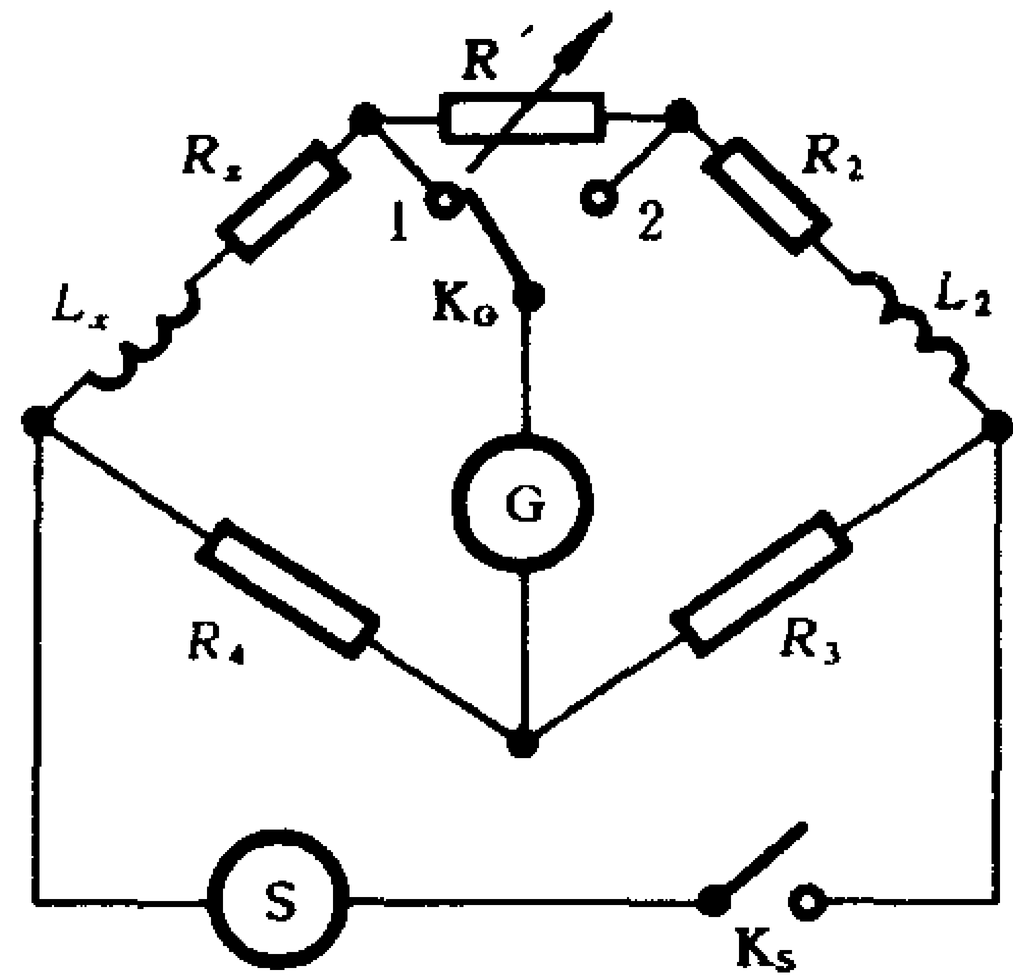


图 25－8　可变电感比较电桥

$$R_x = \frac{R_4}{R_3}(R_2 + R') \qquad (25-18)$$

当 K_G 与 2 接通时，

$$R_x = \frac{R_4}{R_3}R_2 - R' \qquad (25-19)$$

由于可变标准电感的精确度较差，因此 L_2 常用固定标准电感代替．为了使电桥平衡，可分别反复调节 R_3 或 R_4 和 R'值．然后，调到电桥平衡往往需要多次地反复调节，特别 R_x 值较大时，次数还要增加．实验时一定要有耐心，细心观察，掌握调节规律．

为了调节电桥平衡，可反复改变 R_3 和 C_3 值．但是特别要使 R_2、R_4 和 C_3 三个量的有效数字尽可能多，才能保证 L_x 有较高的测量精密度．

6．麦克斯韦电桥

在测量线圈电感量的电桥中，Z_2、Z_3 和 Z_4 的选取也不是唯一的．由于标准电感本身损耗较大，精确度不很高，因此尽量用损耗极小的可变空气型标准电容或云母介质电容，可提高 L_x 的测量精确度，还可大大提高测量的速度．

如果 $Z_1 = R_x + L_x\omega j$，$Z_2 = R_2$，$Z_4 = R_4$（即 Z_2 和 Z_4 为纯电阻），

$Z_3 = R_3 // \frac{1}{C_3\omega \mathrm{j}}$，就组成了麦克斯韦电桥．根据电桥平衡的条件

$$R_x + L_x\omega \mathrm{j} = \frac{R_4 R_2}{R_3 // \frac{1}{C_3\omega \mathrm{j}}}$$

化简得到

$$L_x = R_2 R_4 C_3 \qquad (25-20)$$

$$R_x = \frac{R_2 R_4}{R_3} \qquad (25-21)$$

$$Q = \frac{L_x\omega}{R_x} = R_3 C_3 \omega \qquad (25-22)$$

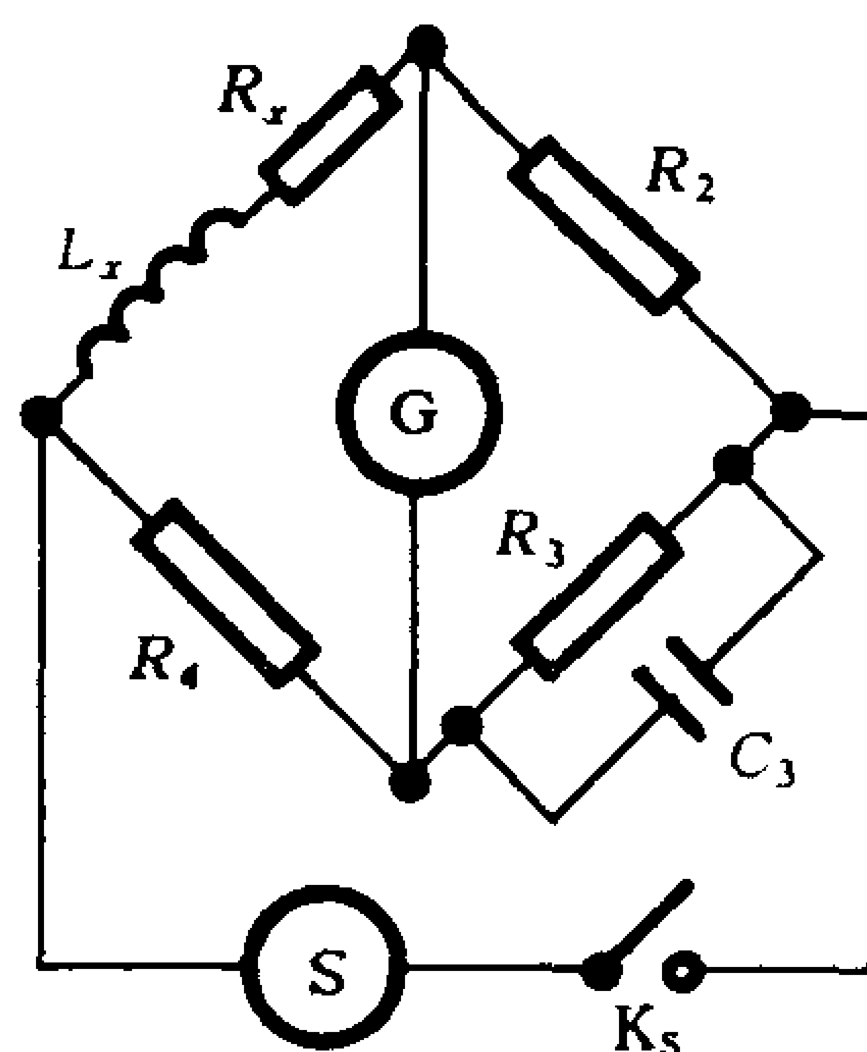


图 25－9　麦克斯韦电桥

麦克斯韦电桥的形式如图 25－9 所示．

7．交流电桥使用中的几个问题

（1）电桥开始调节时应使交流电源的输出幅度尽量小一点．交流示零器的交流电流量程取足够大，然后调节规定的可调量．每改变一次可调量，使交流示零器的指针由大变到不能再小为止，依次反复调节各个可变量，增加电流的输出幅度，减少示零器的量程，提高测量灵敏度．重复上述调节步骤，直到最后结果满足一定的精度要求为止．不过在增加电源输出幅度的同时，要考虑桥臂中各元件是否承受得住其最大功耗的要求．

（2）用电桥测量时，往往总是分粗测和精测两步来进行．粗测的目的是知道待测元件的大致数值和范围．精测的目的则是选择合适的元件和数值，确保各量的精密度，以保证最后结果的准确度．

（3）为了消除某些系统误差，还必须将有关元件进行交换、替代、改变桥臂位置等方法进行组合测量[①]，然后由各种方法得到的

① 组合测量法，就是将系统误差变为偶然误差，再进行偶然误差的有关处理，得出结果．有关组合测量法可参看：肖明耀．误差理论与应用．北京：计量出版社，1985．

数值求出最后结果.

(4) 在决定各直接量的偶数误差时,一定要实事求是,注意观察. 若电桥已处于平衡状态,为了确定某一量的偶然误差,可改变该量的大小,直到示零器能分辨出电桥失去平衡,那么改变量就是该量的偶然误差. 显然,分辨率越高,偶然误差越小,有效数字位数越多. 最后根据各直接量的误差不难得出最后结果的总误差[①].

实验内容和要求

1. 用自搭电容比较电桥(如图 25-5 所示的线路),测定待测电容 C_x 的电容量并计算出 ΔC_x 值和 R_x 值.

要求取 $R_3=R_4=10\ 000\ \Omega$、$1\ 000\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 三种情况进行测量;取 $R_3=10\ 000\ \Omega$ 时,R_4 分别为 $1\ 000\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 二种情况进行测量.

2. 用自搭西林电桥,取合适的 R_2 和 C_4,测定 C_x 和 R_x 值. 要求 C_x 有四位有效数字.

3. 用自搭自感比较电桥测定待测线圈的 L_x 及其 ΔL_x 和损耗电阻 R_x. (只要求进行一次测量,L_x 应有三位有效数字)

4. 用麦克斯韦电桥(如图 25-8 所示),测定待测线圈的 L_x 值要求尽可能高的测量精密度,写出实验操作步骤和有关数据.

预习思考题

1. 实际电容器与理想电容器有什么区别?

2. 为什么电容器的损耗角 δ 越大,它的质量越差?

3. 实际电感线圈与理想线圈有什么区别? 衡量线圈品质优劣的物理量是什么? 怎样定义的?

4. 交流电桥平衡的条件是什么? 有无绝对平衡?

5. 当 $Z_1=R_x+\dfrac{1}{C_x\omega \mathrm{j}}$ 作为待测阻抗,再与 $Z_2=R_2, Z_3=R_3+\dfrac{1}{C_3\omega \mathrm{j}}$,

---

① 这里指的偶然误差都是与灵敏度有关的误差,因此也称为灵敏度误差.

$Z_4 = R_4 // \frac{1}{C_4\omega j}$组成交流电桥．能否平衡？为什么？

6．图25－8中的开关K_G和R'有什么作用？

复习思考题

1．怎样确定交流电桥平衡时各调节量的偶然误差？

2．调节交流电桥的平衡有什么心得体会？

3．根据自搭电容比较电桥的数据分析，关于测量C_x可得到哪些规律？

4．用自搭西林电桥测定C_x和R_x值时，你是怎样得到四位有效数字的C_x？这四位数字是否都是准确的？（注意电容箱的误差，见附记．）

5．用自感比较电桥测定L_x有什么体会？

6．用麦克斯韦电桥测定同样的L_x有什么特点？

7．交流电桥调节平衡的过程是怎样的？能否加快调节速度，即减少可调量调节的次数①？

［附记］

标准电容箱

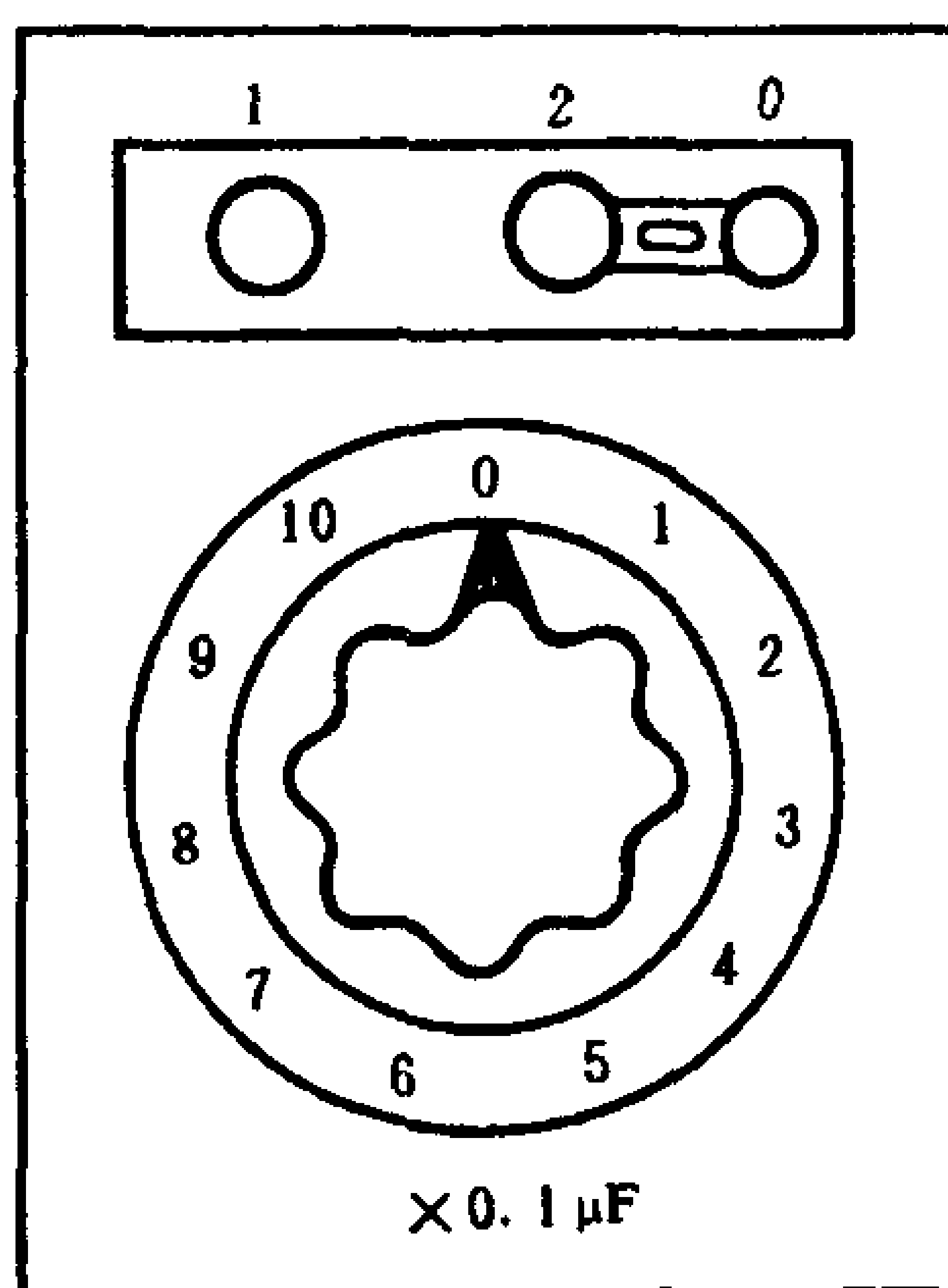


图25－10　RX7型电容箱

① 本题较难，可参照有关交流电桥平衡收敛问题的讨论，作进一步思考．

RX7 型电容箱如图 25 - 10 所示，它是一种精密的旋钥式十进电容箱，可工作在交流频率 1 500Hz 范围以内的电路中，可作为交流电桥的可变电容器或滤波电路的元件，以及其他需要电容能在很大范围内变化的电路中，它的技术特性如表 25 - 1 所示.

表 25 - 1 RX7 型电容箱的技术特性

型式	容量/μF	旋钮数	可变范围/μF	最小步长
				μF
RX7 - 0	0～1.111	4	(0～10)×(0.000 1+0.001+0.01+0.1)	0.000 1
RX7 - 1	0～1.110	3	(0～10)×(0.001+0.01+0.1)	0.001
RX7 - 2	0～1.10	2	(0～10)×(0.01+0.1)	0.01
RX7 - 3	0～0.11	2	(0～10)×(0.001+0.01)	0.001
RX7 - 4	0～1.00	1	(0～10)×0.1	0.1
RX7 - 5	0～0.10	1	(0～10)×0.01	0.01
RX7 - 6	0～0.01	1	(0～10)×0.001	0.001

RX7 型电容箱的准确度如下：

10×0.1 μF 组　　±0.5%

10×0.01 μF 组　　±0.65%

10×0.001 μF 组　　±2%

10×0.000 1 μF 组　　±5%

例如用 RX7 - 0 型式的电容箱作为交流电桥的可变电容器，电桥平衡时它的指示值

$$C = 0.658\,4\mu F$$

则 C 的准确度不超过

$$\begin{aligned}\delta C &= 0.6\times0.5\% + 0.05\times0.65\% \\ &\quad + 0.008\times2\% + 0.000\,4\times5\% \\ &= 0.003 + 0.000\,325 + 0.000\,16 + 0.000\,02 \\ &= 0.003\,505\mu F\end{aligned}$$

说明电容值 C 在小数点后第三位就不准确了，由于以上考虑了最

大的不准确程度，所以小数点后第三、四位有一定的参考价值．如果作为最终结果，则可写成

$$C = 0.658\,4 \pm 0.003\,5 \mu F$$

或者取 $C = 0.658 \pm 0.004\ \mu F$

不难理解，电容值的准确度主要取决于第一位电容数字的准确性．注意：上述计算都应遵守下列条件

1．周围温度＋20 ℃±5 ℃，相对湿度 30%～80%；

2．工作频率 800～1 000 Hz；

3．所加电压不大于允许值；

4．电容箱的起始电容（参看后面的说明）应从测量结果中除去．

RX7 型电容箱的温度系数不超过 1.5×10^{-4}(1/℃)

电介质损耗角的正切值（tg δ）不超过

10×0.1 μF 组	2.5×10^{-3}
10×0.01 μF 组	3.3×10^{-3}
10×0.001 μF 组	1×10^{-2}
10×0.000 1 μF 组	5×10^{-2}

起始电容值可查阅下表：

型式(RX7)	RX7－0	RX7－1	RX7－2	RX7－3	RX7－4	RX7－5	RX7－6
起始电容≤	80 pF	60 pF	40 pF	40 pF	25 pF	25 pF	25 pF

RX7 型十进式电容箱是由不同个数的十进开关组件组合而成，每个十进开关组件是由四个比值为 1、2、3、4 的云母电容器，通过特制的容量选择开关可任意并联组合而成，因此能得到 0～10 之间任何一个电容值，如图 25－11 所示．电容箱所采用的全部电容器是以优质云母片作介质和铝箔交叠而成，并紧固在具有稳定压力的金属压板间，电容经石腊的浸渍和稳定处理后，密封在胶木盒内，电容箱的所有部件及整个电气部分均安装在金属面板上，并装在带屏蔽的胶木盒内，电容箱的引出端在面板上，即标记“1”和

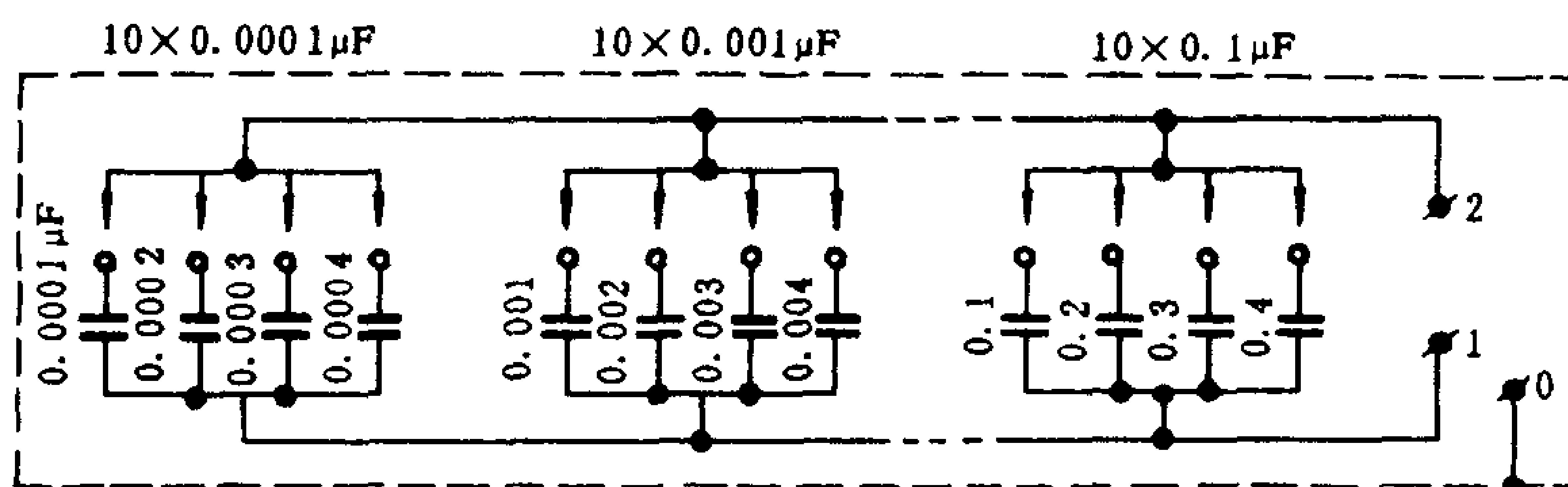


图 25－11　十进式电容箱接线图

“2”的二端钮，屏蔽有专用引出端，即标记“0”的端钮.

电容箱接入工作线路时，可采用二端式或三端式接法，用二端式时应考虑分布电容 C_{20} 的影响，如图 25－12 所示；用三端式时应考虑 C_{10}、C_{20} 的影响.

每只电容箱的 C_{10} 与 C_{20} 值不全相同，经计量后将其值注明在它的面板上. 因此电容箱的电容值，对于二端式应该是 $C_{12}+C_{20}$，三端式是 $C_{12}+C_{20}+C_{10}$.

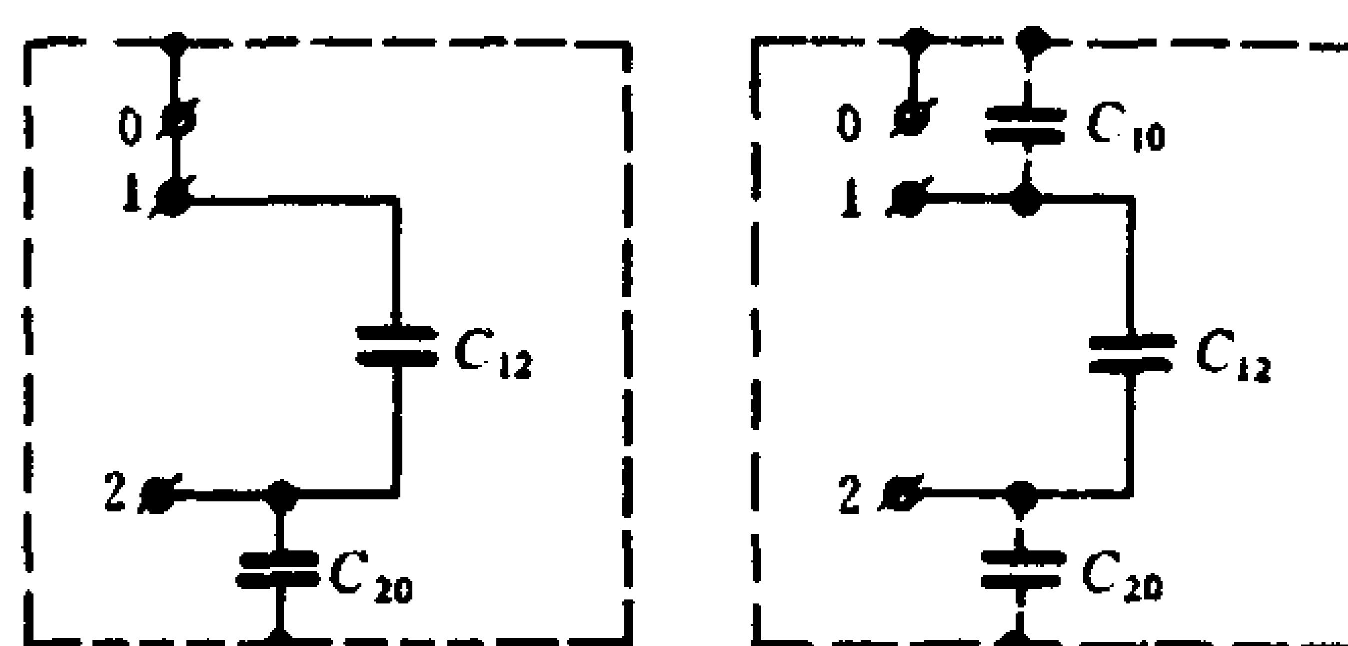


图 25－12　分布电容补偿图

实验二十六　*LRC* 电路的稳态特性

目的

1．研究交流信号在 *LRC* 串联电路中的相频和幅频特性；

2．学习使用双踪示波器，掌握相位差的测量方法；

3．复习、巩固交流电路中的矢量图解法和复数表示法．

仪器和用具

音频信号发生器、双踪示波器①、交流毫伏表、电阻箱、标准电感、标准电容箱、数字频率计等．

原理

利用矢量图解法可以把简谐交流的峰值与矢量的大小相联系，相位或初相位与矢量的方向相联系，它是计算交流电路的一种有用而直观的方法．但在一些复杂的交流电路中，往往很难画出对应的矢量图．简谐量的复数法可以克服上述的缺点，而且可以得到相应于直流电路的交流欧姆定律和交流基尔霍夫定律的复数形式．对于纯电阻、纯电感和纯电容在交流电路上的作用可以用复阻抗 Z 来表示．

本实验主要研究 *RC* 和 *RL* 串联电路中电压值随频率变化的规律（称幅频特性），电压与电流间的相位差随频率变化的规律（称相频特性）以及 *RLC* 串联电路的相频特性．

1．*RC* 串联电路的幅频特性和相频特性

RC 串联电路如图 26－1(a)所示．由于交流电路中的电压和电流不仅有大小变化而且还有相位差别，因此常用复数及其几何

---

① 或通用示波器．

表示——矢量法来研究，由复电压($\tilde{U}$)与复电流($\tilde{I}$)之比得到的阻抗也是复数即复阻抗(Z).RC 电路的复阻抗为

$$Z = R - \mathrm{j}\frac{1}{C\omega} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2}\,\mathrm{e}^{-\frac{1}{C\omega R}\mathrm{j}} \qquad (26-1)$$

其中阻抗幅值 $$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2} \qquad (26-2)$$

由于电阻值和频率无关，电阻两端电压与电流同相位，若用矢量求解法则应以电流为参考矢量，作 U_R、U_C 及其合成的总电压 U 的矢量图，如图 26-1(b)所示.

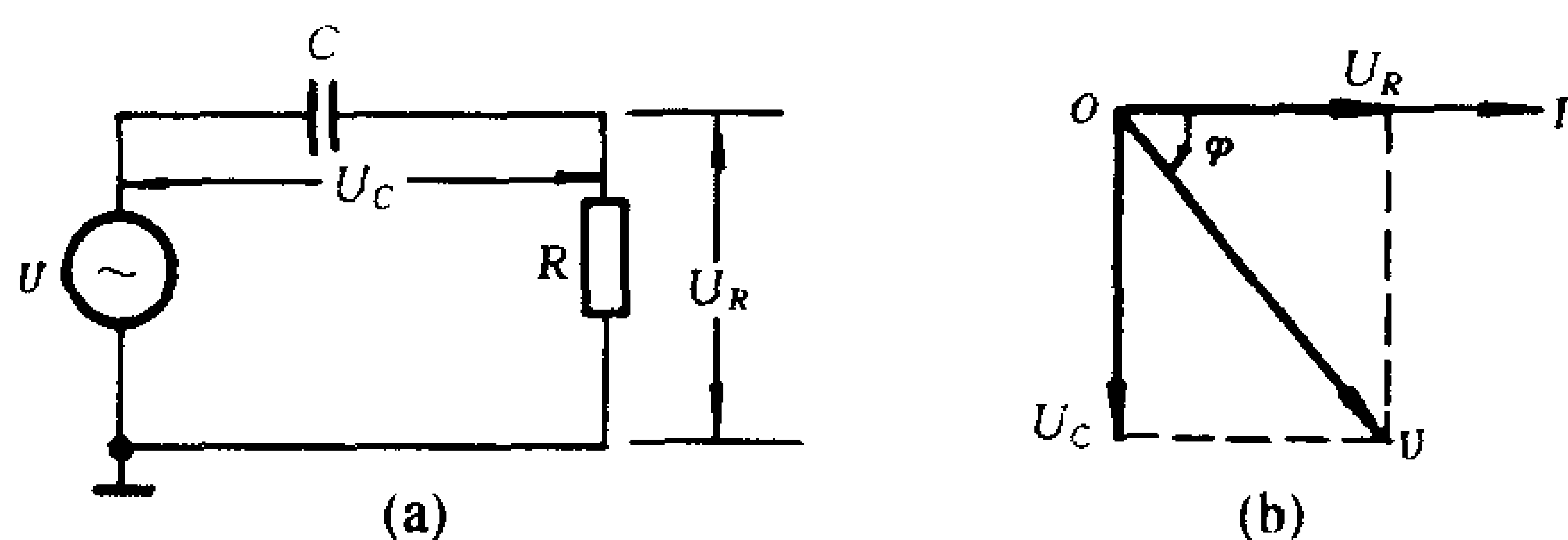


图 26-1 RC 串联电路

总电压

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = I\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2} \qquad (26-3)$$

U 落后于 I 的相位

$$\varphi = \mathrm{arctg}^{-1}\frac{1}{C\omega R} \qquad (26-4)$$

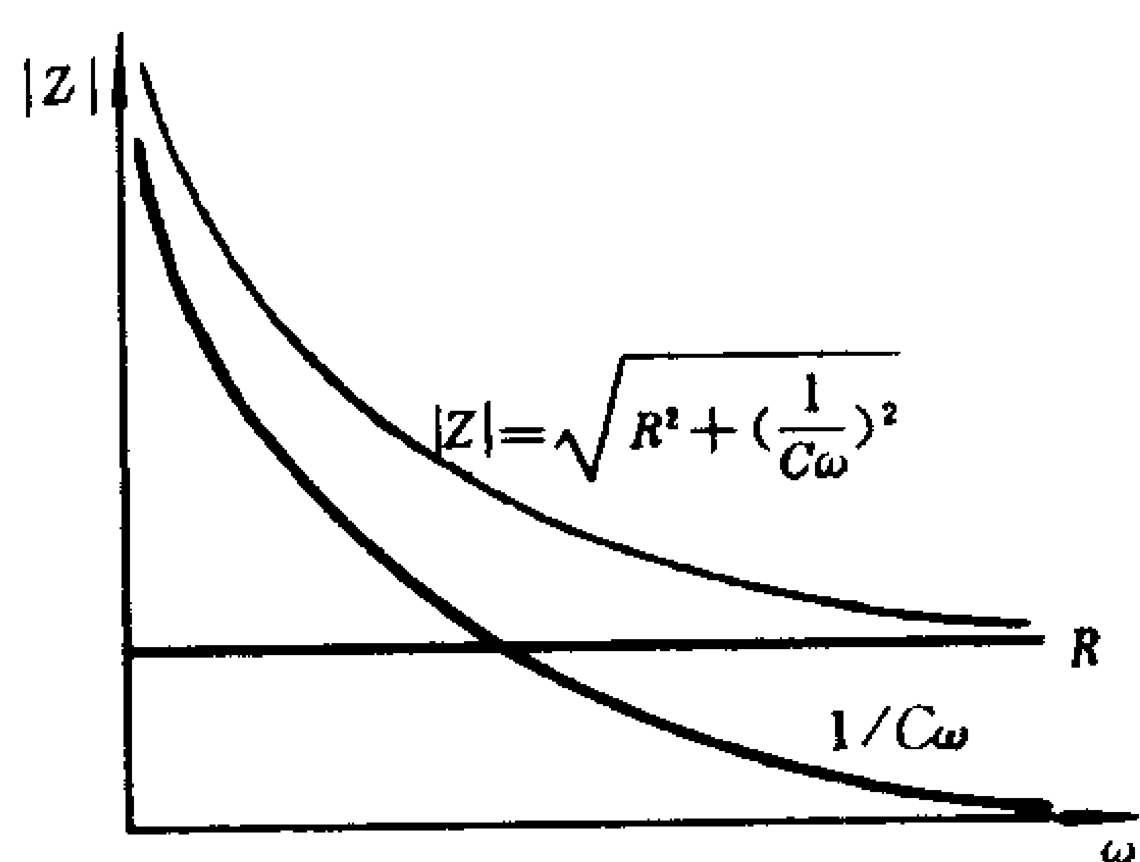
R 两端电压

$$U_R = U\cos\varphi = \frac{UR}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2}} = \frac{URC\omega}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \qquad (26-5)$$

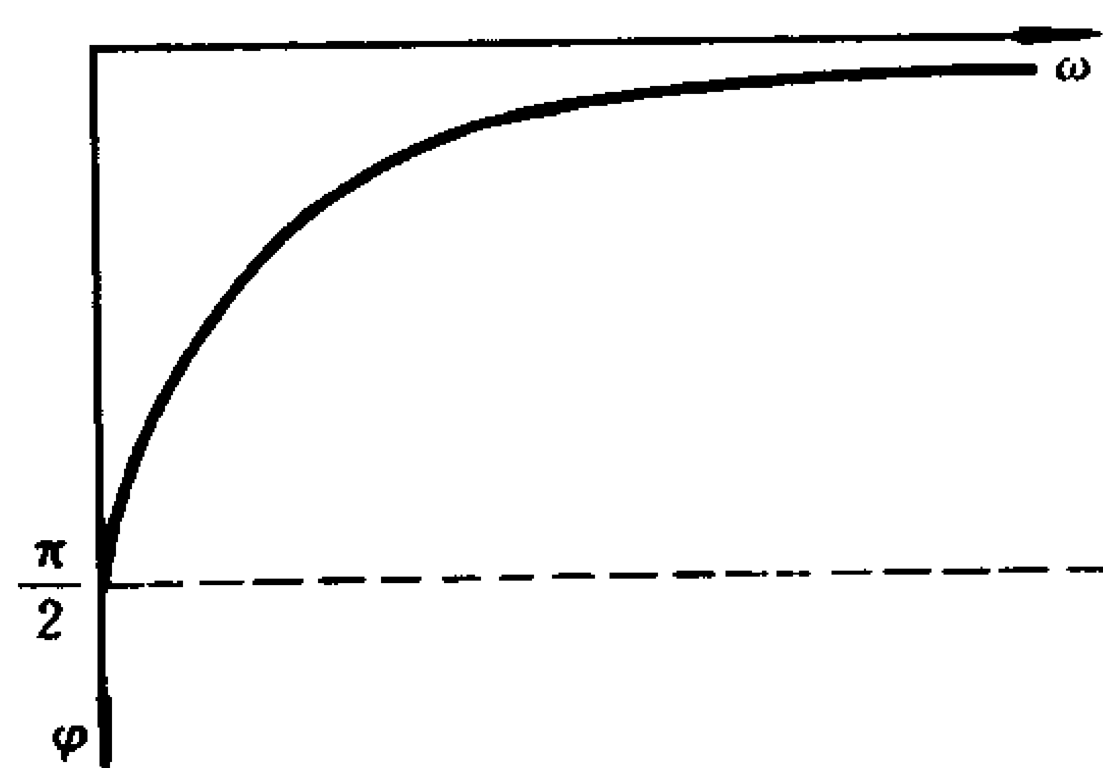
C 两端电压

$$U_C = U\sin\varphi = \frac{U}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}} \tag{26-6}$$

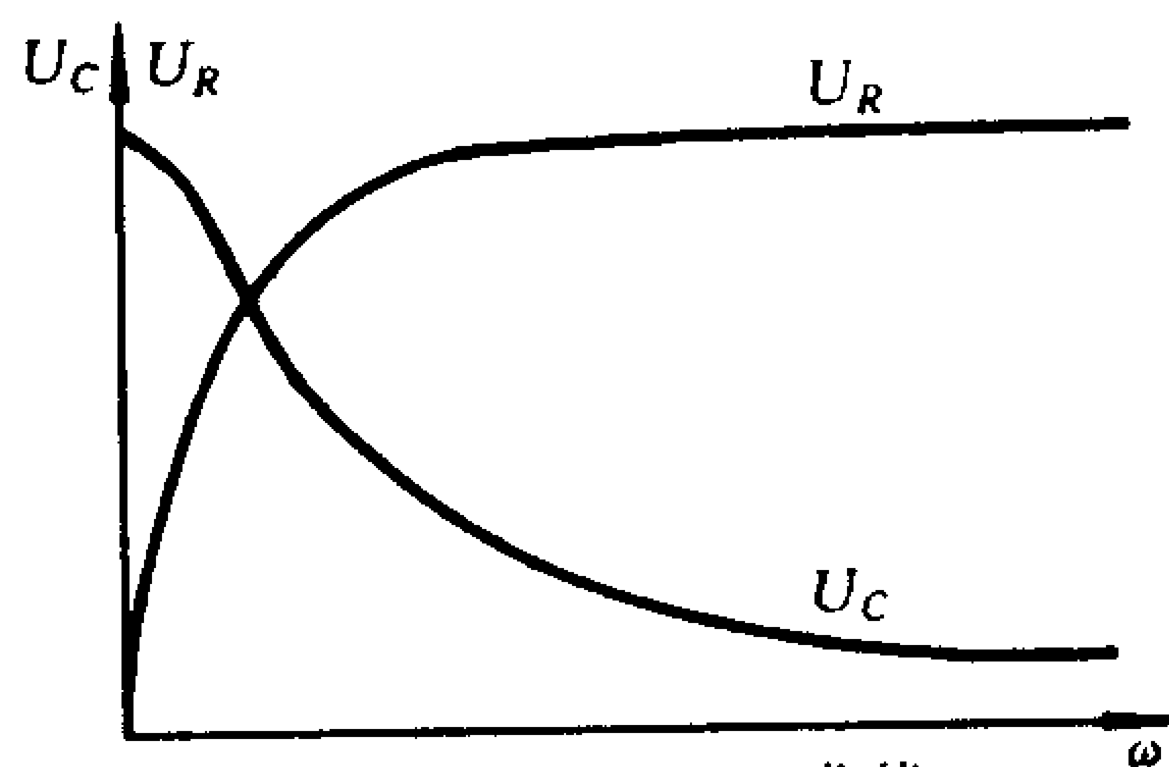
根据(26－2)式可画出$|Z|-\omega$曲线，如图26－2(a)所示. 当$\omega\to0$时，$|Z_R|=R$，$|Z_C|\to\infty$，$|Z|\to\infty$；当$\omega\to\infty$时，$|Z_R|=R$，$|Z_C|=\frac{1}{C\omega}\to0$，$|Z|\to R$. 综上可知：



(a) |Z|- ω 曲线



(b) φ - ω 曲线



(c) U_R, U_C- ω 曲线

图26－2　RC串联电路幅频和相频曲线

(1) 总阻抗在低频时趋于无穷大，在高频时趋于 R 值，反映了电容具有“高频短路、低频开路”的性质.

(2) 根据(26-4)式可画出 $\varphi-\omega$ 曲线，如图 26-2(b)所示，φ 表示 RC 串联电路中的总电压落后于电流的相位，φ 随 ω 的增加逐渐趋于零，随 ω 减小而逐渐趋于 $-\frac{\pi}{2}$、利用相频特性可组成各种相移电路.

(3) 若总电压 U 保持不变，根据(26-5)、(26-6)式可画出 U_C、$U_R-\omega$ 曲线，即幅频特性曲线. 如图 26-2(c)所示. U_C 与 U_R 随 ω 的变化正好相反，由(26-6)式可知，在低频时总电压主要降落在电容器两端，高频时总电压主要降落在电阻两端. 利用幅频特性可把各种频率分开，组成各种滤波电路.

2. RL 串联电路的幅频特性和相频特性

RL 电路如图 26-3(a)所示.

复阻抗 $$Z=R+\mathrm{j}L\omega=\sqrt{R^2+(L\omega)^2}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{L\omega}{R}} \tag{26-7}$$

阻抗幅值 $$|Z|=\sqrt{R^2+(L\omega)^2} \tag{26-8}$$

总电压 $$U=\sqrt{U_R^2+U_L^2}=I\sqrt{R^2+(L\omega)^2}$$

从矢量图解(如图 26-3(b)所示)可看出，总电压 U 超前于 I，相位差

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{L\omega}{R} \tag{26-9}$$

R 两端电压

$$U_R=U\cos\varphi=\frac{UR}{\sqrt{R^2+(L\omega)^2}} \tag{26-10}$$

L 两端电压

$$U_L=U\sin\varphi=\frac{UL\omega}{\sqrt{R^2+(L\omega)^2}} \tag{26-11}$$

综上可知：

(1) RL 串联电路的阻抗随频率增加而增加，反之减小.

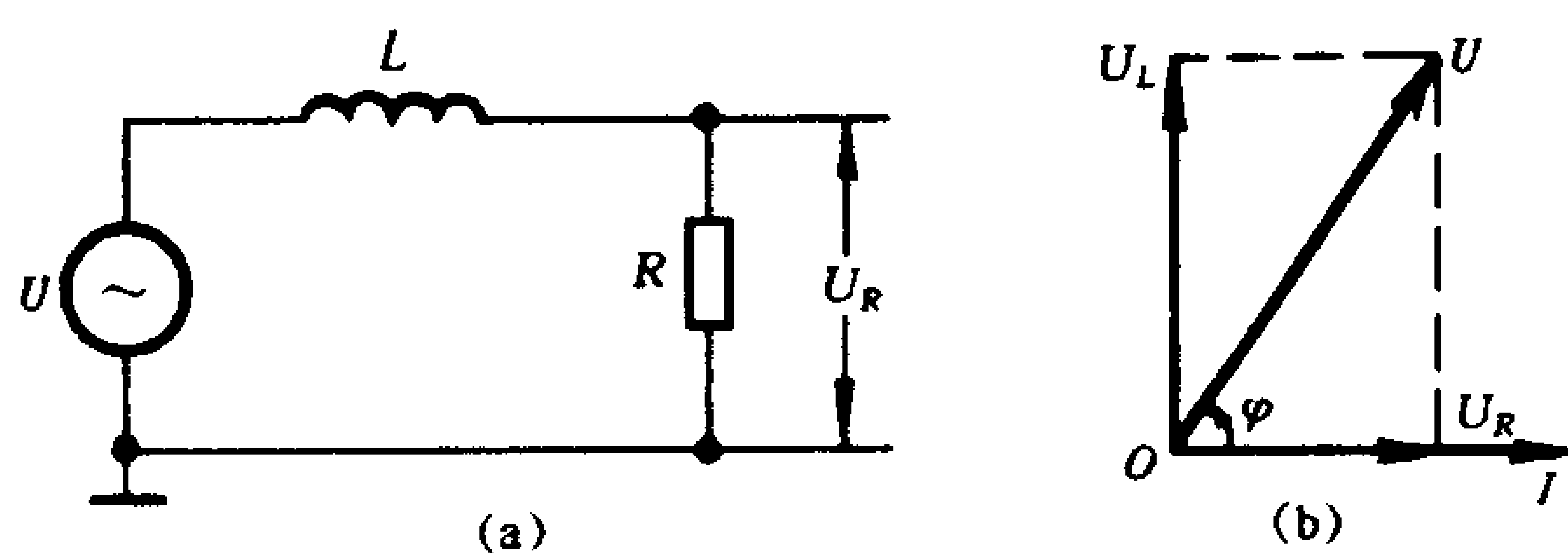


图 26－3　*RL* 串联电路

(2) 根据(26－9)式,说明总电压的相位始终超前于电流的相位,相位差随频率的增加而逐渐增加,高频时相位差渐近 $+\frac{\pi}{2}$. 同样利用 *RL* 的相频特性也可以构成各种相移电路. 见图 26－4.

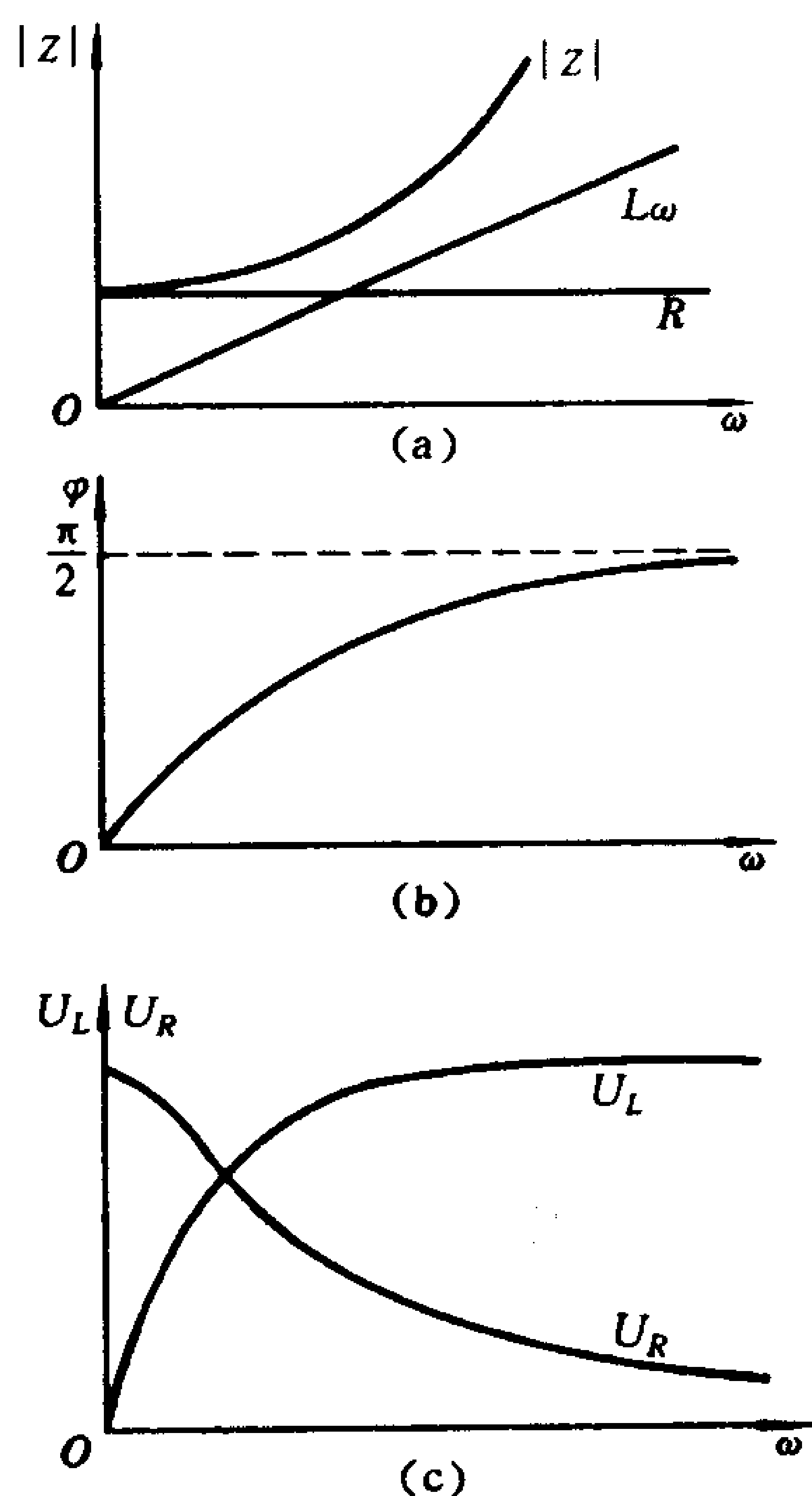


图 26－4　*RL* 串联电路的幅频、相频特性曲线

(3) 若总电压维持不变，U_L 与 U_R 随 ω 的变化趋势正好相反，低频时电压主要降落在电阻两端，高频时电压主要降落在电感两端，这说明电感具有“高频开路，低频短路”的性质，利用 RL 幅频特性也可组成各种滤波器.

3. LRC 串联电路的相频特性

LRC 串联电路如图 26－5 所示.

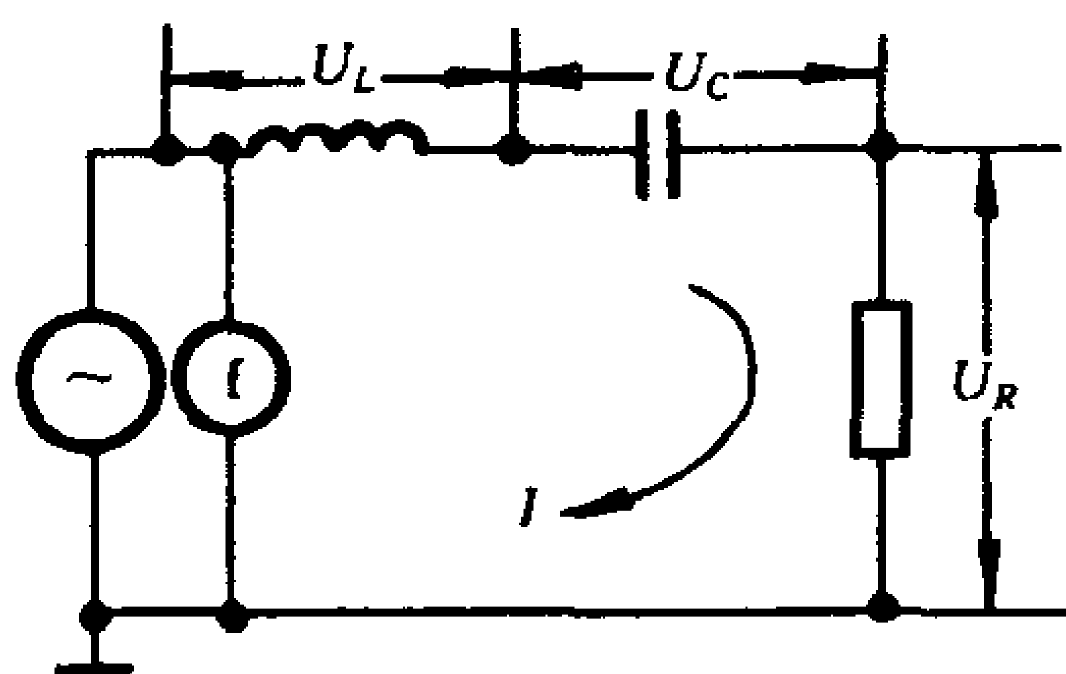


图 26－5　LRC 串联电路

复阻抗　$Z = R + j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} e^{j\varphi}$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} \tag{26-12}$$

现分下列三种情况讨论：

(1) 当 $\omega L = \frac{1}{C\omega}$ 时 $\varphi = 0$，总电压与电流同相位，电路中阻抗最小，呈纯电阻，此时电路中电流达到最大值，称为串联谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{26-13}$$

(2) 当 $\omega L - \frac{1}{C\omega} > 0$，电路呈电感性，$\varphi > 0$，表示总电压的相位超前于电流的相位，随 ω 增大 φ 趋于 $\frac{\pi}{2}$.

(3) 当 $\omega L - \frac{1}{C\omega} < 0$，电路呈电容性，$\varphi < 0$，表示总电压的相

位落后于电流的相位，随 ω 减小 φ 趋于 $-\frac{\pi}{2}$. 三种情况矢量图解如图 26－6(a)、(b)、(c)所示.

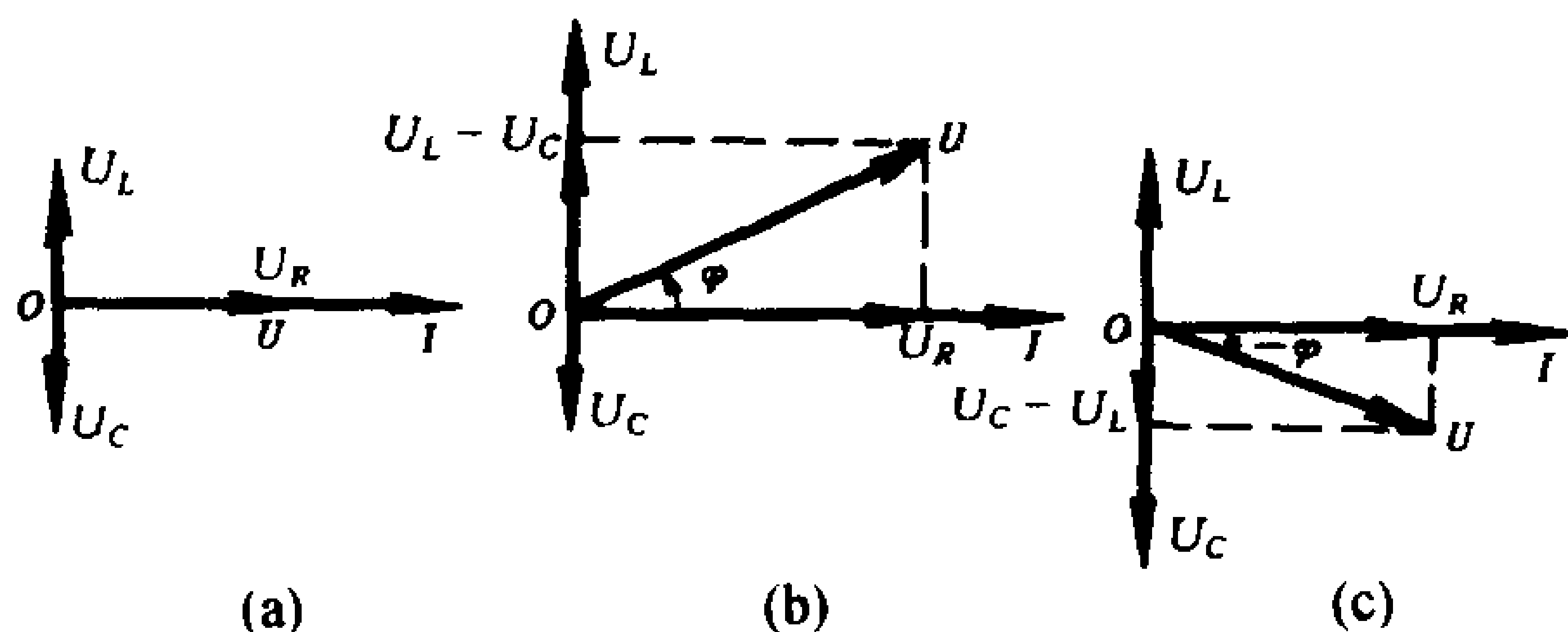


图 26－6　LRC 串联电路矢量图

$$\text{tg } \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}\left(\sqrt{LC}\omega - \frac{1}{\sqrt{LC}\omega}\right)$$

$$= \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$$

而 $Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$，即为 RLC 串联电路的品质因数. 则

$$\text{tg } \varphi = Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) = Q\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right) \qquad (26-14)$$

上式表示如以 $\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)$ 为自变量 x，以 tg φ 为应变量 y，则函数 $y = Qx$ 为一斜率为 Q 通过原点的直线，而

$$\varphi = \text{arc tg}\left[Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)\right]$$

φ 随 $\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$ 的变化曲线如图 26－7 所示.

4. 幅频特性的测试方法

这是研究回路电流 I 与频率 f 的关系. 以 RC 串联电路为例，可按图 26－8 的测量电路. 图中 S 为低频信号发生器，R 为可变电阻箱，C 为可变容箱，V 为交流毫伏表，K 为单刀双掷开关，f

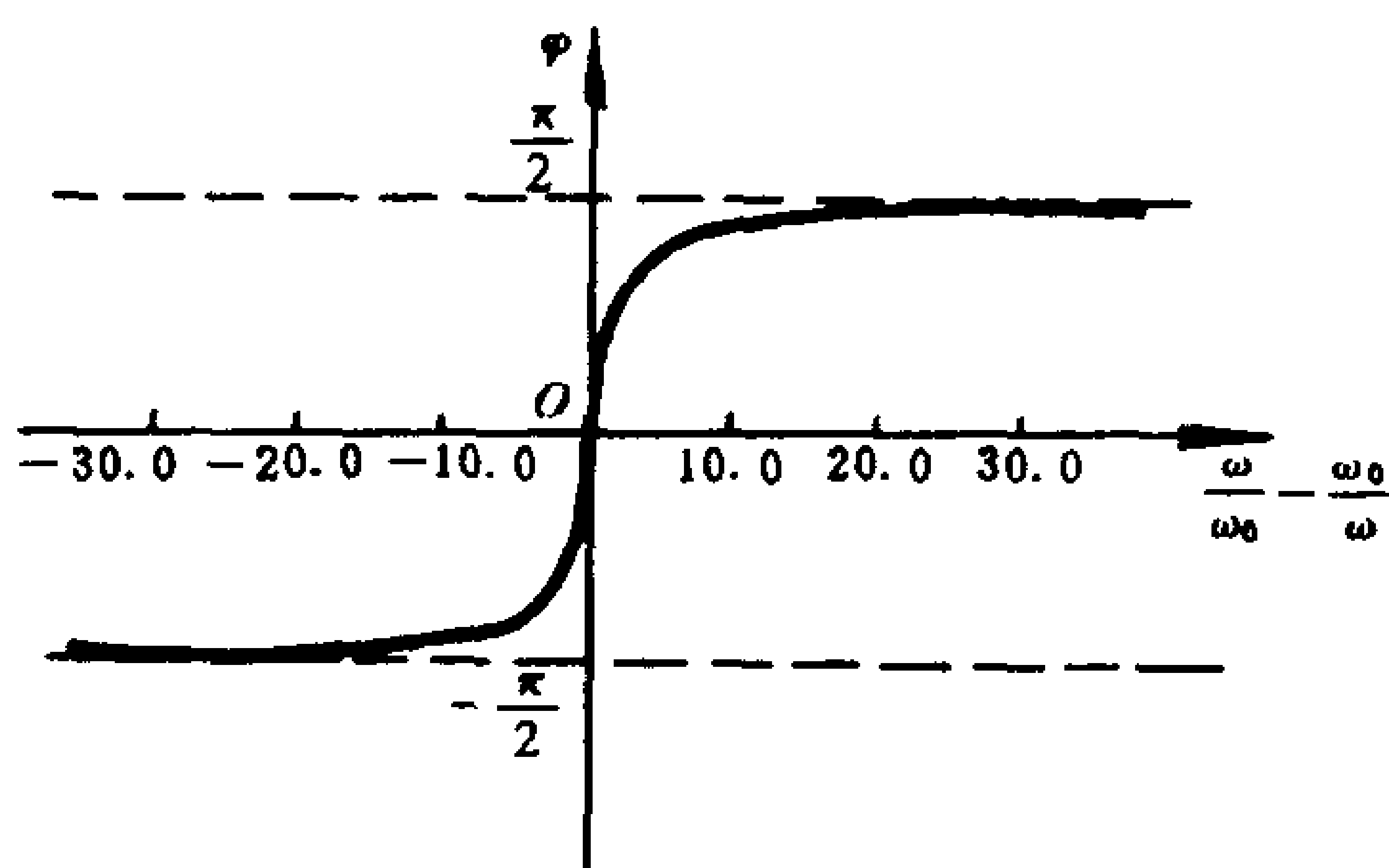


图 26－7　*LRC* 串联电路的相频曲线

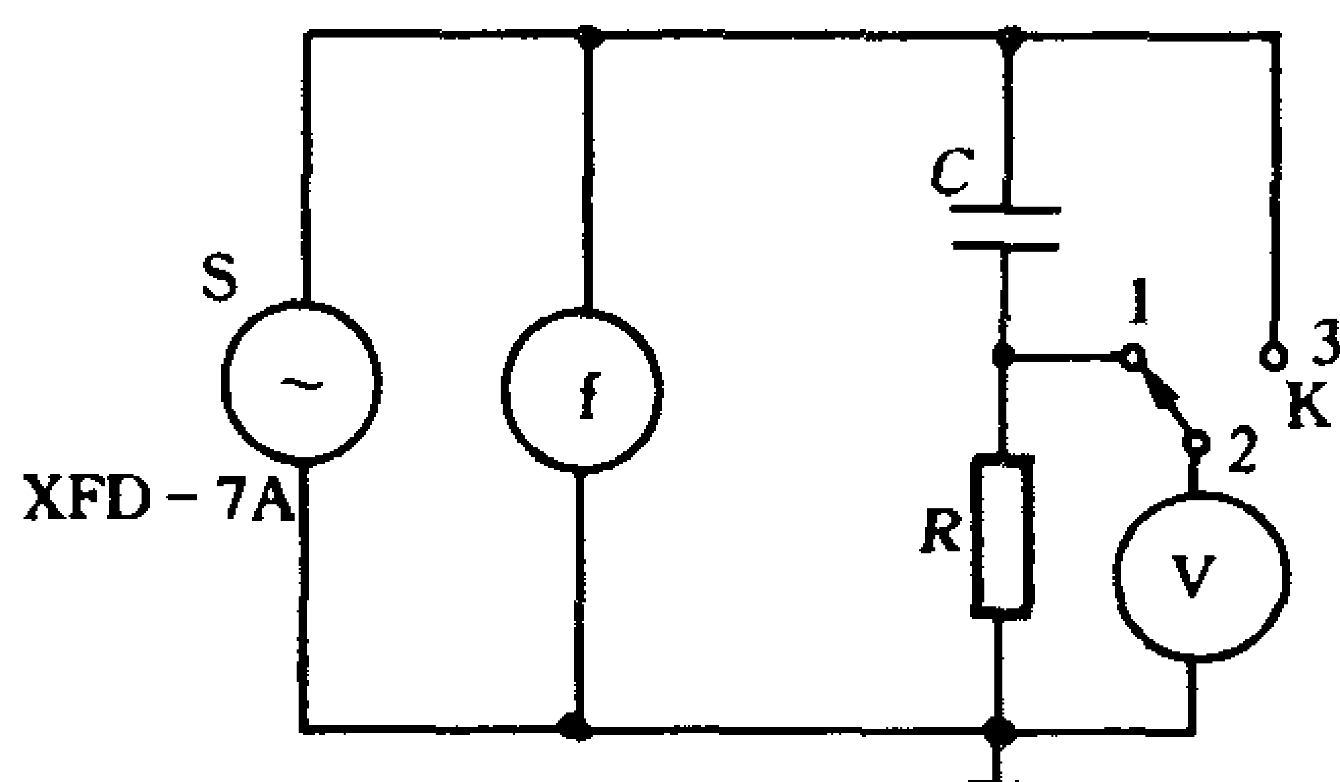


图 26－8　*RC* 电路幅频特性测试电路

为数字频率计.

当开关接到"3"时,交流电压表测量 S 的输出电压有效值,调节 S 的输出幅度,保持在各种频率测量时,U 严格恒定. 当开关接到"1"时,交流电压表测量的是 R 两端的电压 U_R. 取不同的频率值,U 保持不变,测出各种频率时 U_R 值,并算出 I 值. 取 f 为横坐标,I 或 U_R 为纵坐标,就可绘出 *RC* 电路的电流或电阻两端电压与频率的特性曲线,简称 *RC* 电路的电流幅频特性曲线.

如果要测 *RC* 电路中电容两端的电压与频率之间的关系,可将图 26－8 中 R 与 C 的位置相互对换进行类似上面的测量。

5. 相频特性的测试方法

这是研究回路电压 U 对回路电流 I 的相位和频率的关系，由于电阻 R 两端电压 U_R 和通过的电流 I 的相位总相同，因而可以用 U_R 代替 I 去和 U 比较相位.

(1) 用双踪示波器去比较测量

若要测量 RC 电路中回路电压对回路电流的相位和频率的关系，可按图 26－9 的测量线路接线.

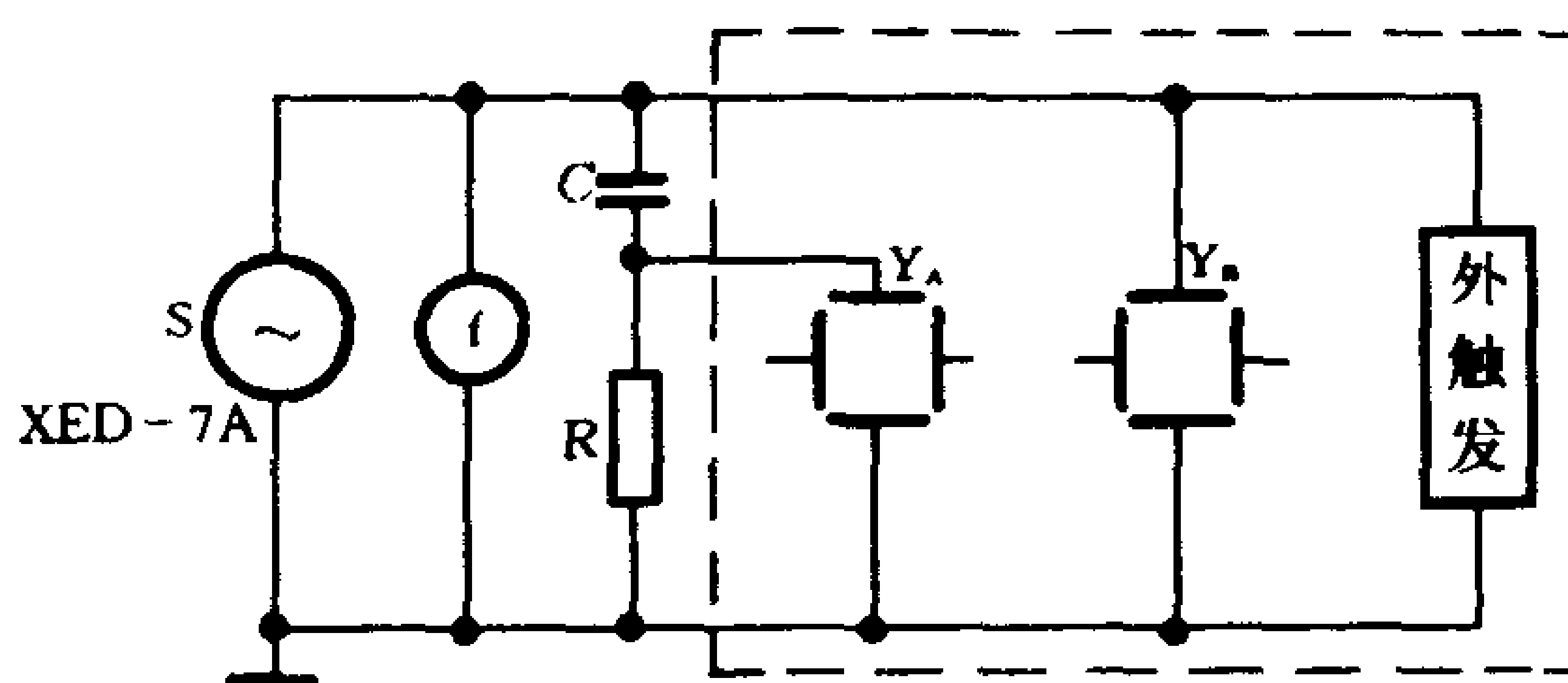


图 26－9　$U_{总}$ 与 I 的相位差与频率关系测量图

图中虚线框内就是双踪示波器(例如 SBE－20)，两个信号输入端 Y_A、Y_B 分别与电阻 R 和信号发生器 S 的输出端相连，此外为了使示波器的水平扫描完全与 Y_A、Y_B 信号同步来测量两信号的相位差，S 输出还与示波器的"外触发"端钮相连，并且将"触发"选择旋钮转到"外"的位置. 选择开关是用来对示波器单踪或双踪工作状态进行选择，当指示"交替"时，表示双踪的工作状态在一个扫描时间内 Y_A 与 Y_B 通过的信号交替通过电子交换器，在荧光屏上同时显出两个波形，当指示"断续"时，在一个扫描时间内 Y_A、Y_B 信号分别通过电子交换器 n 次，因此在示波器荧光屏上显示两个断续光点的波形，通常适用于测量低频信号，如图 26－10 (a)、(b)所示。

调节二波形的水平位置使 x 轴重合，参照图 26－10 测量 T 及 Δt 的对应格数 $n(T)$ 及 $n(\Delta t)$，则相位差 $\Delta\varphi$(以弧度为单位)为

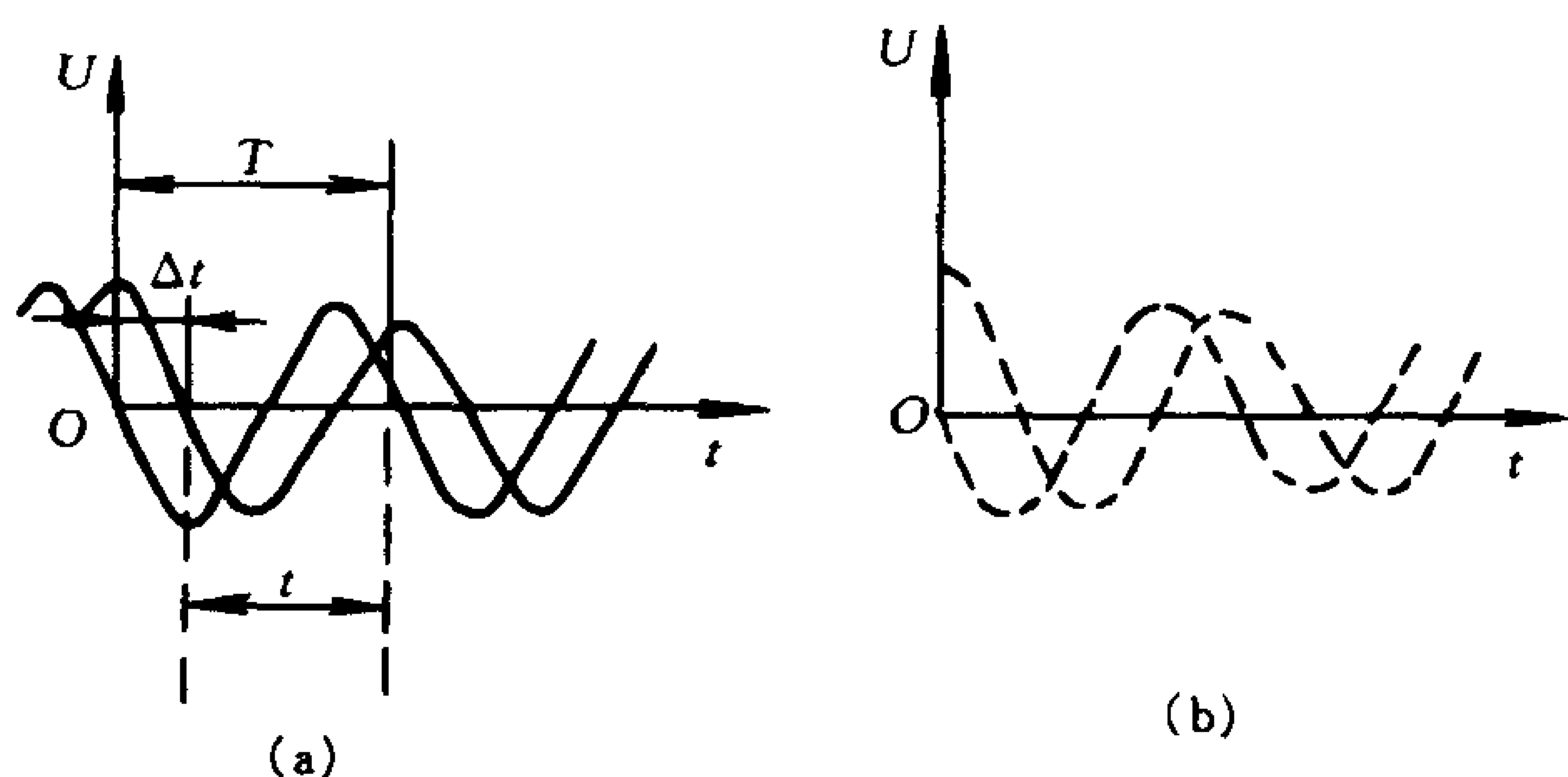


图 26－10

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot n(\Delta t)/n(T)$$

根据上面的方法，可选不同频率的正弦波输出，得到对应的相位差；同样的频率 f 为横坐标，相位差 $\Delta\varphi$ 为纵坐标，就可画出 RC 电路的电流与外加电压 U 之间相位差和频率的关系曲线，简称相频曲线.

如果图 26－9 中的电容器改用电感线圈 L，就可用来测量 RL 电路的相频特性。如果在 C 和 R 中间再串一只线圈 L，就可用来测量 RLC 电路的相频特性，这里指的相频是总电压和电路中的电流之间的相位差和频率的关系.

(2) 用通用示波器去比较测量

将 U_R 和 U 分别接到示波器的 X、Y 输入端，X 选择调离扫描档，则显示如图 26－11 的椭圆，参照此图测量 $2a$ 和 $2x$ 对应的格数 n_a、n_x，则相位差

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{n_x}{n_a}\right)^{①} \quad (26-15)$$

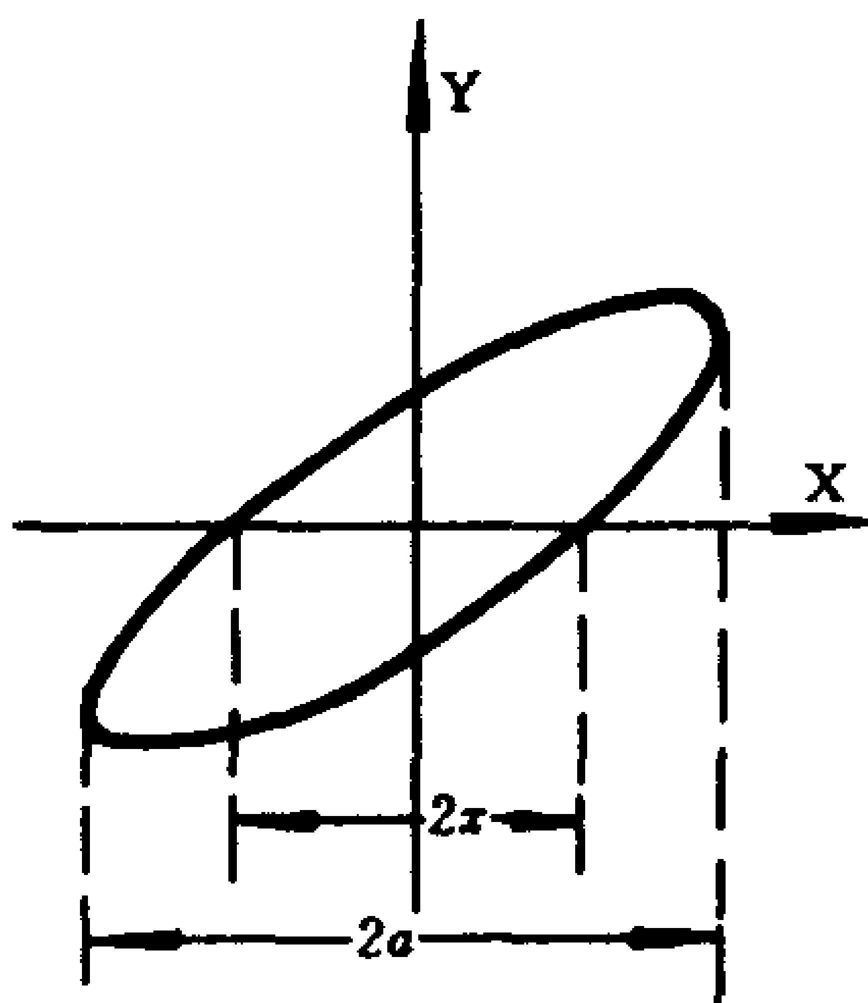


图 26－11

① 参照实验二十，示波器的应用“4. 测二信号相位差”.

测量不同频率的 $\Delta\varphi$ 值，作 $\Delta\varphi - f$ 曲线.

注意：信号发生器输出端必须正确接线，图 26－12 画出了各端钮图. 按照安全用电规则，发生器的外壳要接地. 如果将输出端钮 A、C 或 B 的任一"接地"，则其他两端对地的输出波形如图 26－13 所示；如果输出端钮中，没有一个端钮接地，则各输出端对地没有信号输出.

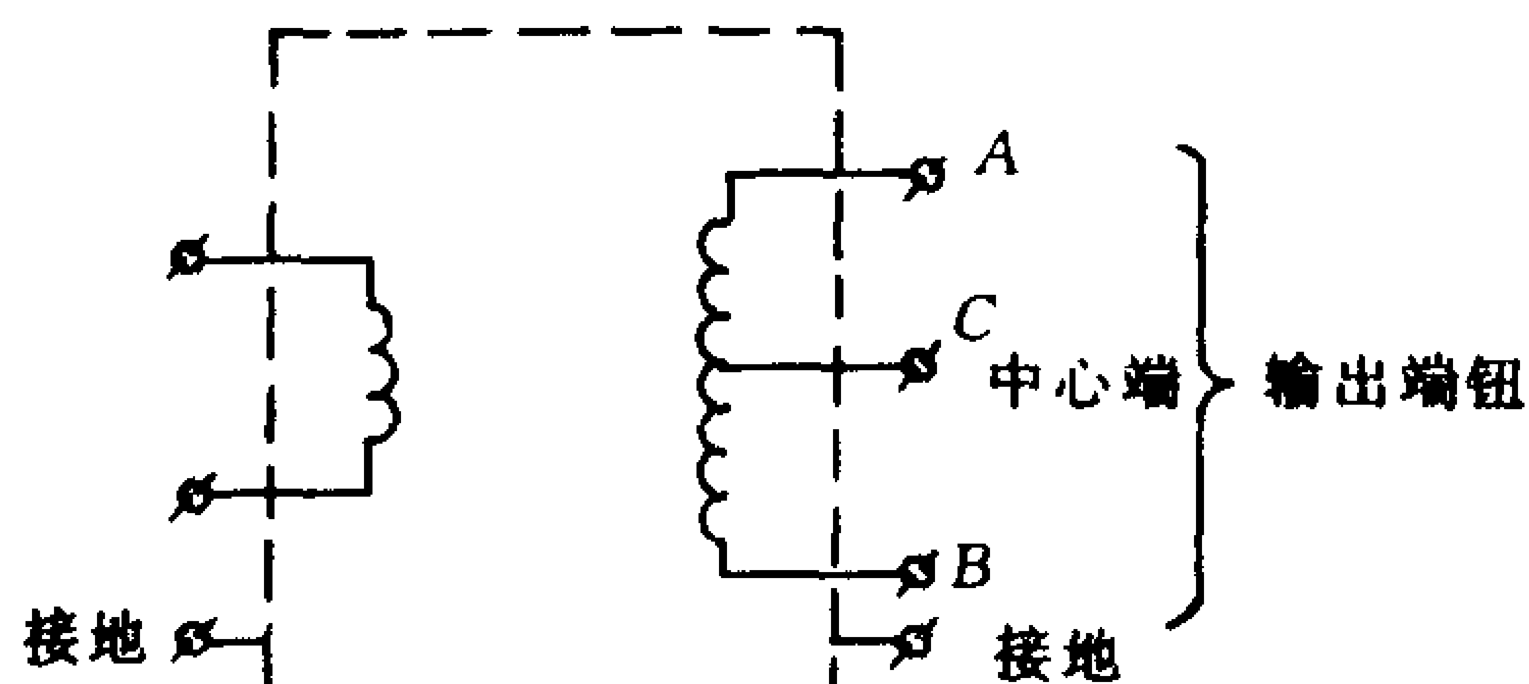


图 26－12

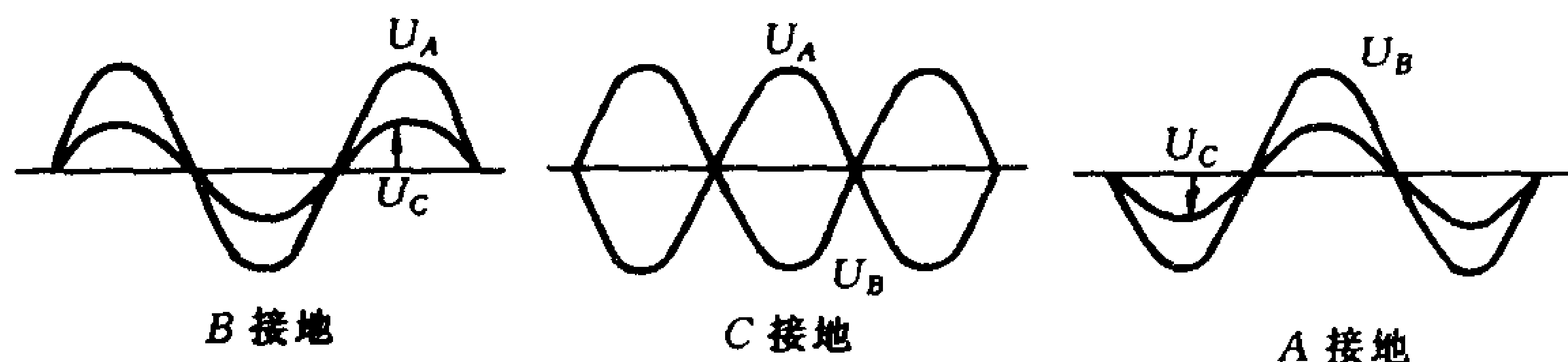


图 26－13

实验内容

1. RC 串联电路幅频特性测定

参照图 26－8 的电路，取 $R = 500.0\ \Omega$，$C = 0.500\ 0\ \mu F$，在测量不同 f 的 U_R 时，必须使 U 值保持恒定（例如取 $U = 1.00\ V$），频率 f 从 100 Hz 到 1 500 Hz 之间变化 10 种.

作 $I - f$ 幅频特性曲线或 $U_R - f$ 曲线.

按照同样方法测量和描绘 $U_C - f$ 特性曲线.

2. 选取 $f = 1\ 000$ Hz 所测得的 U_R、U_C 值，根据矢量图解法

计算 $U_{总}$ 和 φ 值，并与实验值加以比较，计算相对偏差。

3. *RC* 串联电路的相频特性的测定

参照图 26－9 的电路，取 $R = 500.0\ \Omega, C = 0.500\ 0\ \mu F$，频率在 100～1 500 Hz 间改变 10 种，测出各频率对应的相位差 $\Delta\varphi$ 值，作 $\Delta\varphi - f$ 相频特性曲线.

*4[①]. *RL* 串联电路的幅频特性的测定

测量 $U_L - f$ 特性曲线，取 $L = 0.01\ H, R = 500.0\ \Omega$，电路自行设计.

5. *RLC* 串联电路的相频特性的测定

参照图 26－9 在电容器 *C* 的下面串接一线圈. 使 *RLC* 串联电路的谐振频率 $f_0 = 2\ 000$ Hz，根据实验室提供的线圈 *L* 值(例如，$L = 0.01$ H)，计算出相应电容器 *C* 之值. 取 $R = 500.0\ \Omega$，测出 U_R 与 $U_{总}$之间的相位差为零时所对应的频率，即为谐振频率(重复测几次). 将测得的谐振频率值与理论值相比较并计算其相对偏差. 为了考查相频特性可从 f_0 向两侧扩展频率去测量，每侧有 5 个以上数据，所得 $\Delta\varphi$ 值尽量达到 $-50° \sim +50°$. 注意，凡是 $U_{总}$ 超前 U_R，$\Delta\varphi$ 取"＋"，相反则取"－". 根据测量值以 $\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)$为自变量 x，作 $\Delta\varphi - \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)$曲线图.

预习思考题

1. 在 *RC* 串联电路中如何测量 U_C 的幅频特性?

2. 怎样测量 *RC* 串联电路 *U* 和 *I* 的相频特性?

3. 测定两正弦波的相位差($U_{总}$ 与 U_R)与示波器的 X 轴扫描速率有何关系?

4. 测量相频特性时是否要保持电源输出电压不变?

5. 如何测定 *RLC* 串联电路的谐振频率? 其测量误差又如何估计?

---

① 有 * 号的为选做内容.

复习思考题

1. 在 RC 串联电路中如何测量 U_C 和 I 的相位差，试画出线路图，并加以说明.

2. 在比较两正弦波的相位差时，它们的零电势线是否要一致？

3. 如何判断 RLC 串联电路中 U 和 I 之间的相位差是超前还是落后？又怎样确定电路是呈电感性还是呈电容性？

4. 试设计频率为 1 000 Hz，$U_{总}$ 与 I 的相移为 45°的相移器，并画出测试电路图.

5. 测量 RLC 串联电路的谐振频率有几种方法？各有什么优缺点？

[附记]

表 26－1　电路元件的阻抗

电路元件	$Z=R+jX=\|Z\|e^{j\phi}(\Omega)$			
	R	jX	$\|Z\|$	ϕ
R	R	0	R	0
L	0	$j\omega L=jX_L$	ωL	$\frac{\pi}{2}$
C	0	$\frac{1}{jC\omega}=-jX_C$	$\frac{1}{C\omega}$	$-\frac{\pi}{2}$

表 26－2　串联电路的阻抗

电路种类	$Z=R+jX(\Omega)$	$\|Z\|=\sqrt{R^2+X^2}(\Omega)$	$\phi=\tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)(\mathrm{rad})$
R_1,R_2	R_1+R_2	R_1+R_2	0
L_1,L_2	$j\omega(L_1+L_2)$	$\omega(L_1+L_2)$	$\frac{\pi}{2}$
C_1,C_2	$-j\frac{1}{\omega}\left(\frac{C_1+C_2}{C_1\cdot C_2}\right)$	$\frac{1}{\omega}\left(\frac{C_1+C_2}{C_1\cdot C_2}\right)$	$-\frac{\pi}{2}$
R,L	$R+j\omega L$	$\sqrt{R^2+\omega^2L^2}$	$\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$
R,C	$R-j\frac{1}{C\omega}$	$\sqrt{\frac{\omega^2C^2R^2+1}{\omega^2C^2}}$	$-\tan^{-1}\frac{1}{\omega CR}$
L,C	$j\left(\omega L-\frac{1}{C\omega}\right)$	$\left\|\omega L-\frac{1}{C\omega}\right\|$	$\pm\frac{\pi}{2}$
R,L,C	$R+j\left(\omega L-\frac{1}{C\omega}\right)$	$\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{C\omega}\right)^2}$	$\tan^{-1}\left(\frac{\omega L-\frac{1}{C\omega}}{R}\right)$

实验二十七　LRC 电路的暂态过程研究

目的

1. 研究 LRC 电路的暂态特性；
2. 加深 L、R、C 各元件在电路中的作用；
3. 进一步熟悉使用示波器.

仪器和用具

示波器(有外触发输入端)、方波发生器、万用表、电容器、标准电感线圈、无感电阻箱.

原理

LRC 电路的暂态过程就是当电源接通或断开后的“瞬间”，电路中的电流或电压非稳定的变化过程. 本实验仅研究 RC 串联电路、RL 串联电路和 LRC 串联电路在接通和断开直流电源时的电流和电压的瞬态特性. 因为这些电路最常用，电路中的暂态过程不可忽视，在瞬变时某些部分的电压或电流可能大于稳定状态时它的最大值的好几倍，出现过电压或过电流现象，所以，如不预先考虑到暂态过程中的过渡现象，电路元件便有损伤甚至毁坏的危险. 另一方面，通过暂态过程的研究，还可从积极方面控制和利用过渡现象，如提高过渡的速度，可获得高电压或者大电流. 下面分别进行讨论.

1. RC 串联电路

将电阻 R 和电容 C 串联成如图 27－1 所示的电路图，根据基尔霍夫定律，当 K 与“1”接通时

$$Ri + q/C = E \qquad (27-1)$$

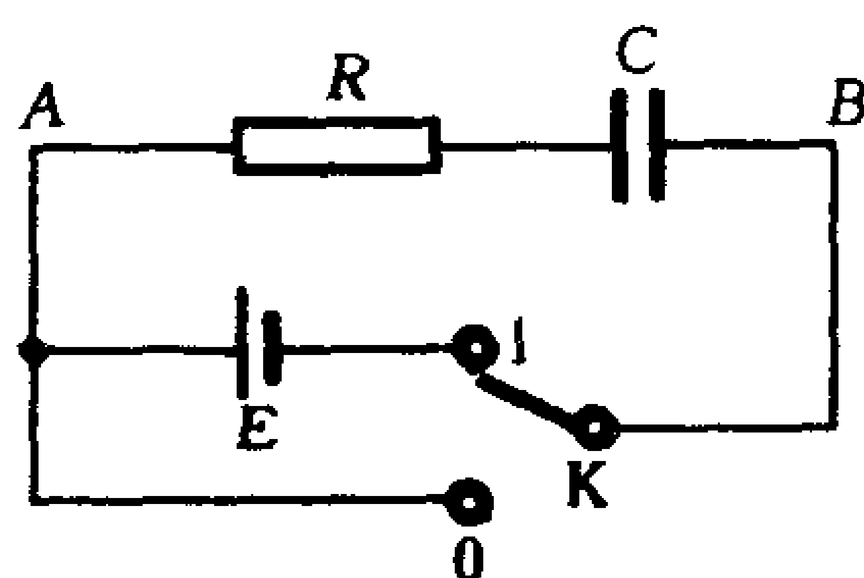


图 27－1　RC 串联电路

或者写作

$$R\frac{dq}{dt}+q/C=E \tag{27-2}$$

上述方程的初始条件是 $q(0)=0$. 即 K 与"0"接通时回路中无电源,因此

$$q=Q(1-e^{-t/\tau}) \tag{27-3}$$

式中 $\tau(=RC)$ 称为 RC 串联电路的时间常数,单位为秒; $Q(=EC)$ 为电容器(C)的端电压为 E 时,所贮藏的电荷量大小,单位为库仑; q 为 t 时刻电容器贮藏的电荷量.

由(27-3)式可计算出电容和电阻两端的电压与时间关系的表示式:

$$U_C=q/C=E(1-e^{-t/\tau}) \tag{27-4}$$

$$U_R=R\frac{dq}{dt}=Ee^{-t/\tau} \tag{27-5}$$

当 K 与"0"接通时,

$$R\frac{dq}{dt}+\frac{1}{C}q=0 \tag{27-6}$$

根据初始条件 $q(0)=Q=EC$,可以得到

$$q=Qe^{-t/\tau} \tag{27-7}$$

$$U_C=Ee^{-t/\tau} \tag{27-8}$$

$$U_R=-Ee^{-t/\tau} \tag{27-9}$$

U_{AB}、q、U_C 和 U_R 的波形如图 27-2 所示. 由图可知:

(1) RC 串联电路中的电容 C 所贮藏的电荷量 q 不能突然变化,因而电容两端的电压也不能突变;但电阻两端的电压却能突变.

(2) RC 串联电路中的过渡时间 τ 与 RC 有关, τ 值大过渡时间长,变化缓慢, τ 值的测量方法如下.

将(27-4)式进行变换可以得到

$$\ln(E-U_C)=\ln E-\frac{1}{\tau}t. \tag{27-10}$$

令 $x=t$, $y=\ln(E-U_C)$,则上式为一直线方程,用图解法或最小

二乘法求出直线的 y 轴截距 a 和斜率 b，则由

$$a = \ln E, b = -\frac{1}{\tau}$$

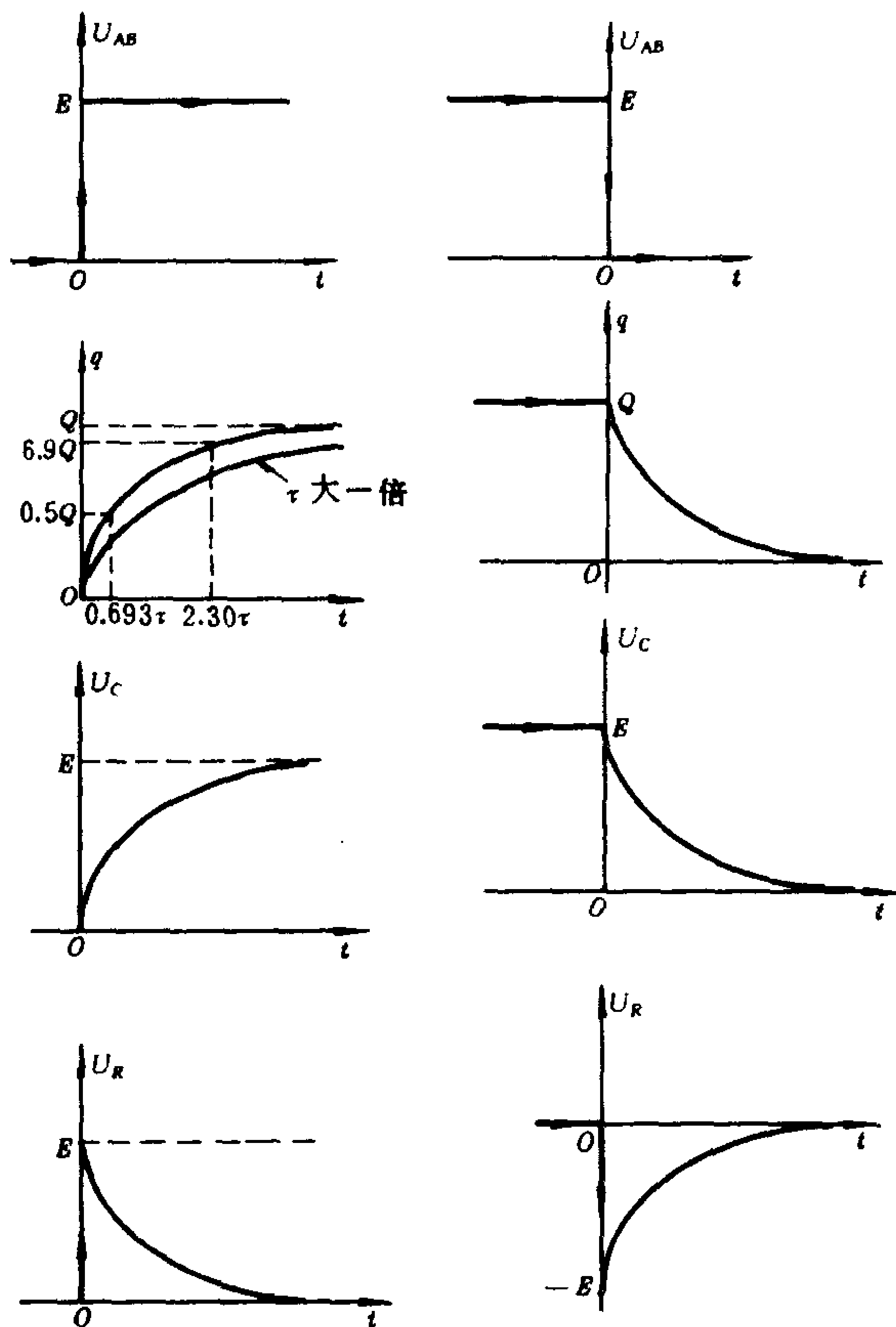


图 27－2　*RC* 电路的开关特性曲线

求出

$$E = e^a, \tau = -\frac{1}{b}$$

2. *RL* 串联电路

将电阻 R 和线圈 L 串联成如图 27－3 所示的线路图. 根据

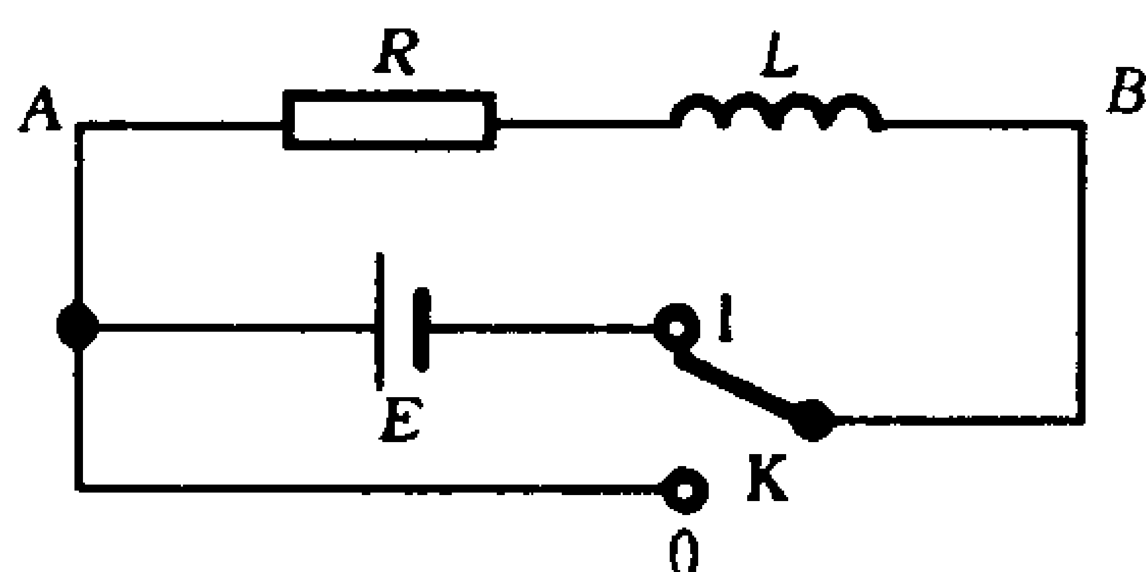


图 27－3 *RL* 串联电路

基尔霍夫定律，当 K 与“1”接通时，

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri=E \qquad (27-11)$$

上述方程的初始条件是 $i(0)=0$，即 K 接至“0”时回路中无电源. 将(27－11)式与(27－2)式相比，$i\to q$，$L\to R$，$R\to 1/C$，因此可得到

$$i=I(1-\mathrm{e}^{-t/\tau}) \qquad (27-12)$$

式中 $\tau=L/R$ 称为 *RL* 串联电路的时间常数，单位为秒；$I=E/R$ 为电路中的最大电流值，单位为安培；i 为 *RL* 串联电路在时刻 t 的电流强度.

同样可得到：

$$U_R=Ri=E(1-\mathrm{e}^{-t/\tau}) \qquad (27-13)$$

$$U_L=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=E\mathrm{e}^{-t/\tau}$$

$$U_L=E-U_R=E\mathrm{e}^{-t/\tau} \qquad (27-14)$$

或者

当 K 与“0”接通时，

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri=0 \qquad (27-15)$$

根据初始条件 $i(0)=E/R=I$，可以得到

$$i=I\mathrm{e}^{-t/\tau} \qquad (27-16)$$

$$U_R=E\mathrm{e}^{-t/\tau} \qquad (27-17)$$

$$U_L=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=-E\mathrm{e}^{-t/\tau} \qquad (27-18)$$

它们的波形类似于 RC 串联电路的，同学可自己仿图 27－2 画出来.

由波形图可知：

(1) RL 串联电路中的电流强度不能突然变化，而线圈两端的电压能够突变.

(2) RL 串联电路中，电压或电流的变化快慢与 $\tau(=L/R)$值有关. τ 值的测量方法可仿照前面相同的步骤进行处理.

3. LRC 串联电路

(1) 放电过程

将 R、L 和 C 串联成如图 27－4 所示的线路图. 当 K 与“1”接通时，电源 E 对电容器 C 充电，充到电容两端电压 U_C 等于 E 时，[①]将 K 与“0”接通.

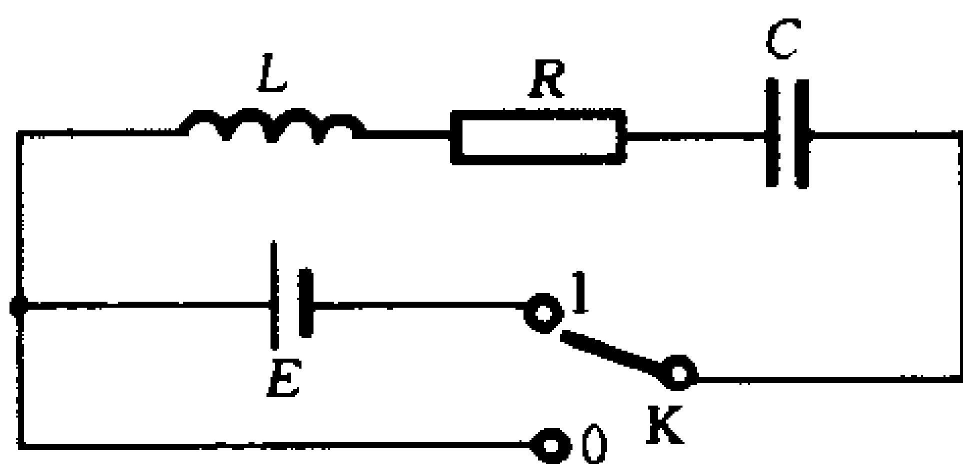


图 27－4　LRC 串联电路

此时　$U_C + U_L + U_R = 0$

即　$U_C + L\dfrac{di}{dt} + iR = 0$

因为
$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dU_C}{dt}$$

则得
$$LC\frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC\frac{dU_C}{dt} + U_C = 0 \qquad (27-19)$$

此方程的解可分为以下三种情况：

① 当 $R^2 < \dfrac{4L}{C}$ 时方程解为
$$U_C = Ae^{-\frac{t}{\tau}}\sin(\omega t + \varphi) \qquad (27-20)$$

其中时间常量
$$\tau = \frac{2L}{R} \qquad (27-21)$$

---

① 由于电源内阻很小，故 RC 电路的 $\tau(=RC)$值很小，从而充电时间很短.

式(27－20)表明,U_C 的振幅按指数衰减,它随时间的变化如图 27－5 所示,是欠阻尼振荡状态。其振荡角频率 ω 为

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{1 - \frac{R^2C}{4L}} \tag{27-22}$$

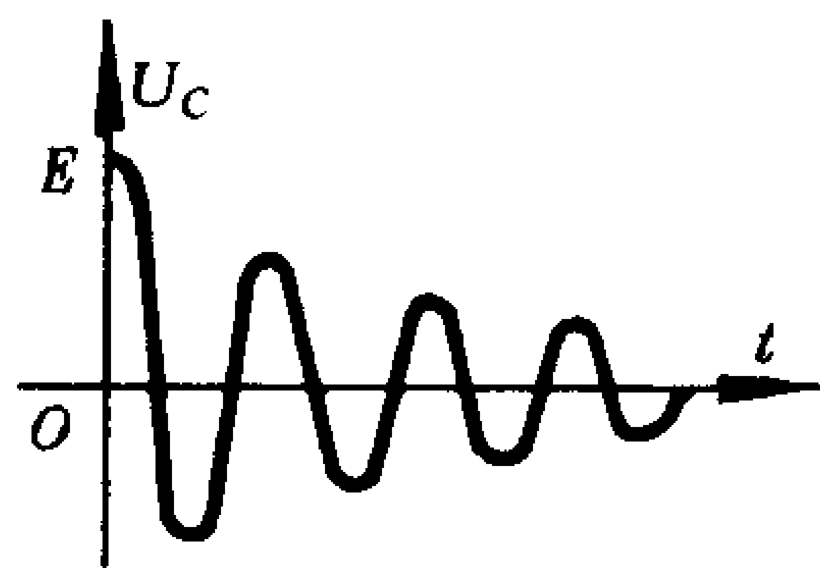


图 27－5

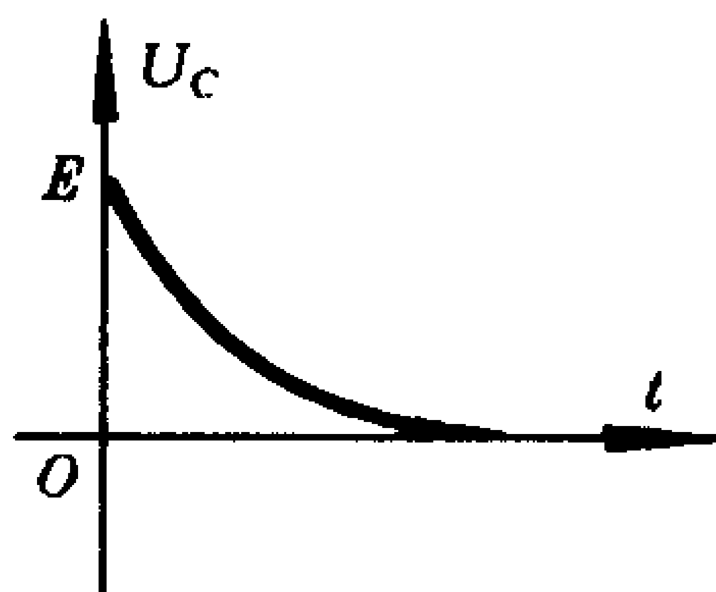
当 $R^2 < \frac{4L}{C}$ 时,这时一般 τ 值很大,振幅的衰减很慢,阻尼振动接近于 LC 电路的自由振荡,此时

$$\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{27-23}$$

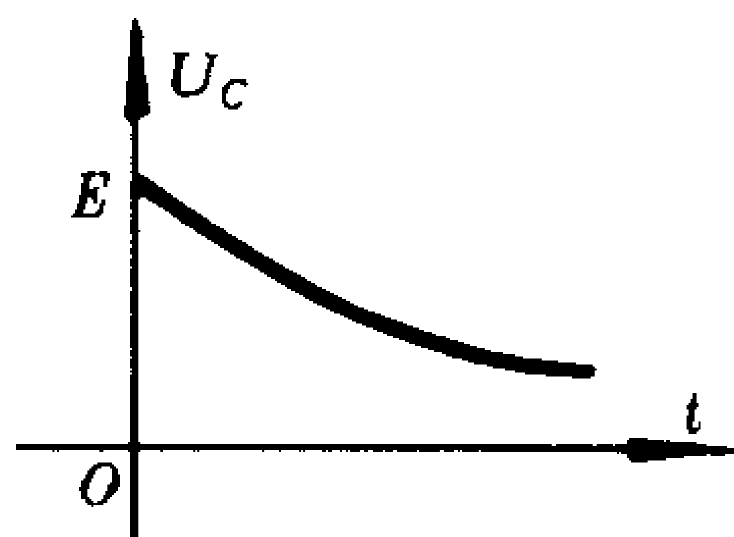
② 当 $R^2 = \frac{4L}{C}$ 时,方程解为

$$U_C = U\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{27-24}$$

这是临界阻尼状态,是欠阻尼振荡刚刚不出现振荡的过渡状态,如图 27－6(a)所示.



(a)



(b)

图 27－6

③ 当 $R^2 > \frac{4L}{C}$ 时,方程解为

$$U_C = Ue^{-\frac{t}{\tau}}\mathrm{ch}(\omega t + \varphi) \tag{27-25}$$

这是过阻尼状态,U_C 和时间 t 的关系如图 27－6(b)所示,也不再出现振荡.

(2) 充电过程

充电过程的电路方程为

$$LC\frac{d^2U_C}{dt^2}+RC\frac{dU_C}{dt}+U_C=U \qquad (27-26)$$

初始条件为 $t=0$ 时，$U_C=0$，$\frac{dU_C}{dt}=0$，和放电过程相似也有三种状态，即当

$$\left.\begin{aligned} R^2<\frac{4L}{C}\text{时}, U_C&=U\left[1-e^{-\frac{t}{\tau}}\cos(\omega t+\varphi)\right]\\ R^2=\frac{4L}{C}\text{时}, U_C&=U\left[1-\left(1+\frac{t}{\tau}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}\right]\\ R^2>\frac{4L}{C}\text{时}, U_C&=U\left[1-e^{-\frac{t}{\tau}}\text{ch}(\omega t+\varphi)\right]\end{aligned}\right\} \qquad (27-27)$$

图 27－7 是三种状态的 U_C-t 曲线.

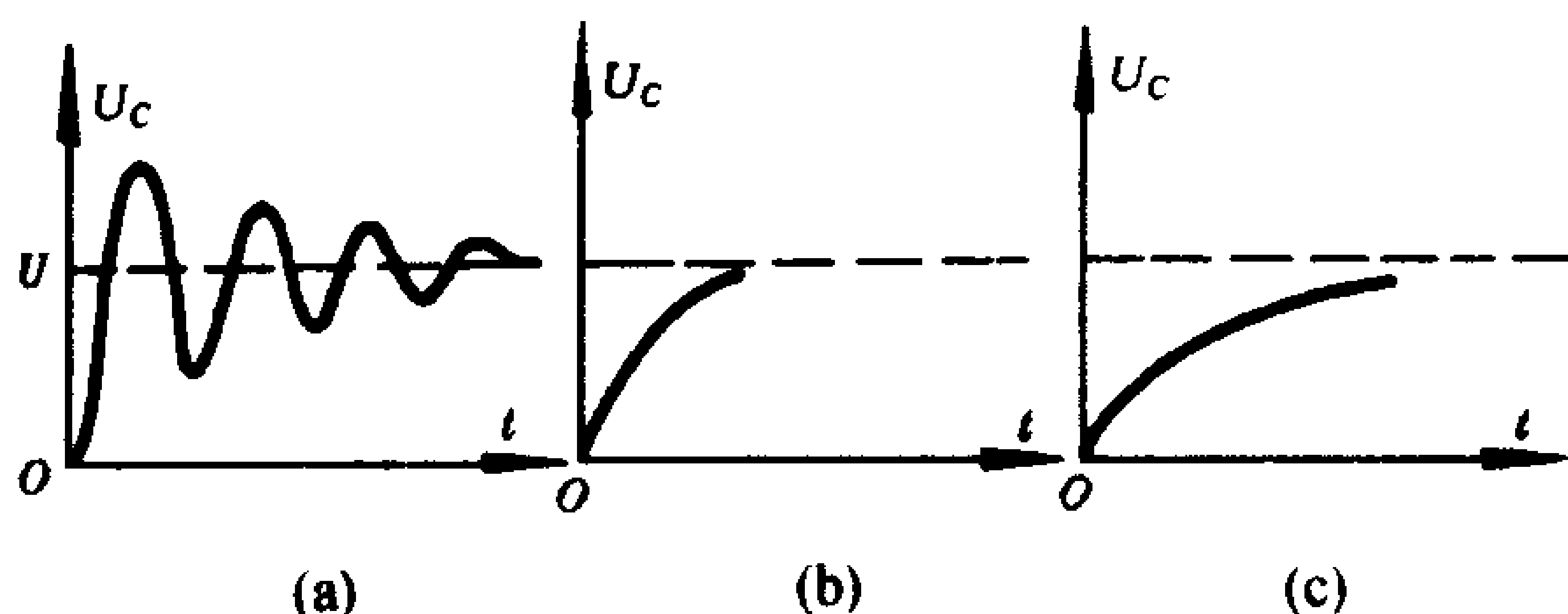


图 27－7

实验内容

1. RC 电路暂态过程的观测

参照图 27－8 的电路图，S 为示波器，F 为方波发生器，用来代替图 27－1 中的直流电源和开关 K. 如图 27－9 所示，方波信号在 0 到 t_1 时间内，以恒定电压 U 加在 RC 电路两端，相当于图 27－1 中 K 倒向 1 的位置，这时电容充电，在 t_1 到 t_2 时间内输出电压降到零，相当于 K 倒向 0 的位置，这时电容 C 经电阻 R 放电. 当方波发

生器连续将方波电压加到 RC 电路时，电路中将周期地发生充放电过程. 在此实验中用示波器观测电容器充放电过程中，电容两端及电阻两端的电压变化规律（U_R 波形与电流 i 波形相同）.

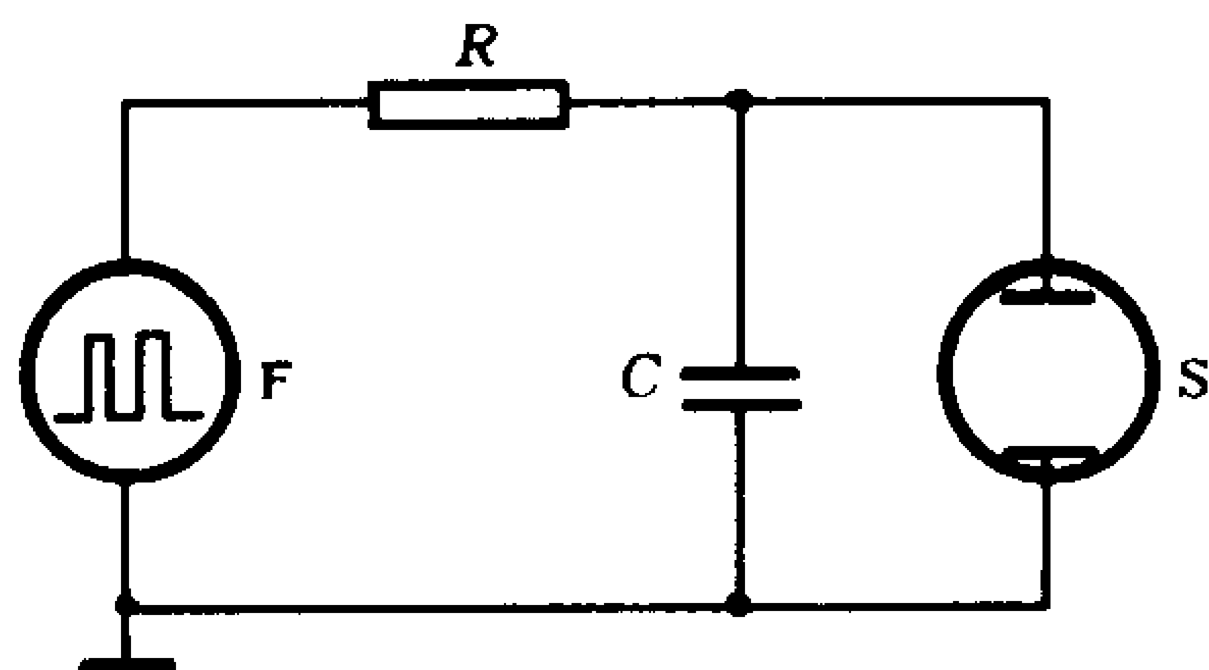


图 27－8

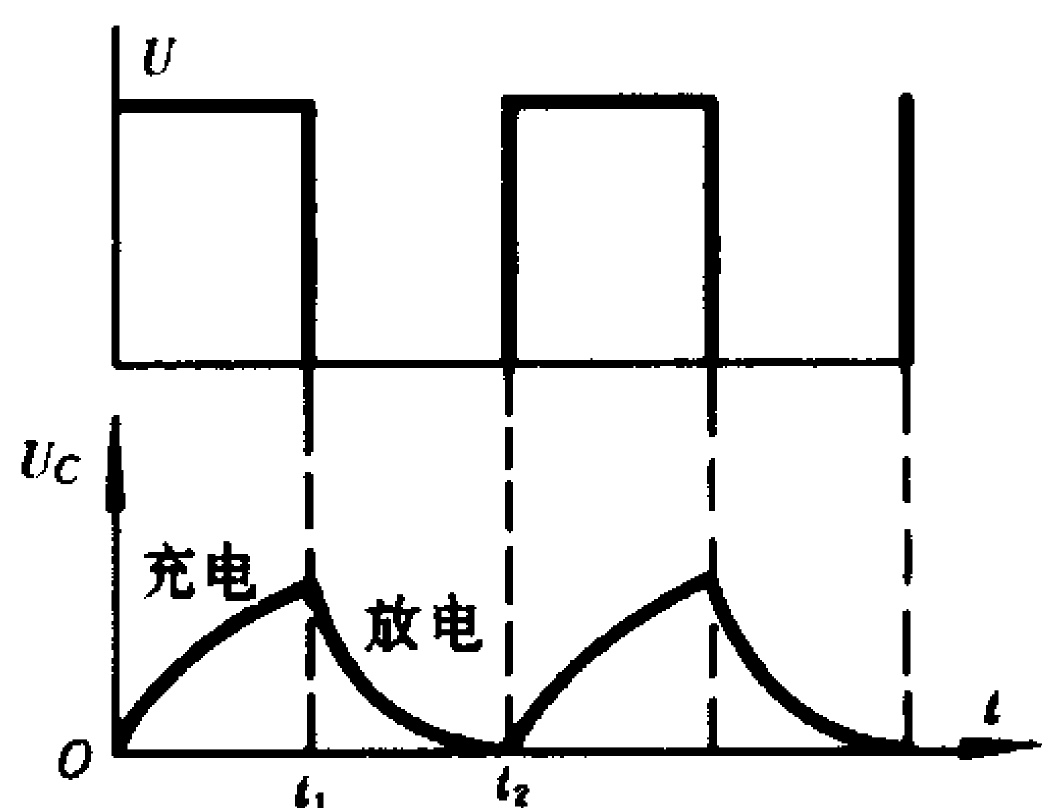


图 27－9

(1) 观测 U_C 波形

方波信号用 500 Hz，取不同的时间常量 RC，用示波器观察 U_C 波形，描绘荧光屏上的波形，分析波形的差异.

(2) 从上述观察中选一种波形，从荧光屏上查出其半衰期 t，求出时间常量再和 RC 值相比较.

(3) 观测电流 i 波形

观察并描绘不同 R 值的电流 i 波形，R、C 取值和(1) 相同.

2. RL 电路暂态过程的观测

参照 RC 电路暂态过程的观测方法，观察不同 RL 的电流 i 波形并描绘.

3. RLC 电路暂态过程的观测

(1) 观测三种阻尼状态

电路如图 27－10，方波信号取 500 Hz，电容取 0.005 μF，改变电阻 R 值，在示波器上观测三种阻尼状态的波形.

实验时电阻 R 由小逐渐增大，最初出现欠阻尼状态，当数值增大到某一数值（R_0）时，波形刚好不出现振荡，电路处于临界阻

尼状态，记下临界电阻 R_0，继续增大电阻，便出现过阻尼状态.

绘出三种状态的波形.

(2) 测量欠阻尼振荡周期 T

选一欠阻尼振动波形，测出其 n 个周期的时间 t，求出周期 T，记下 R、L、C 值.

(3) 测量欠阻尼振荡的时间常量

放电过程电容器两端电压为

$$U_C = A e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t + \varphi)$$

由示波器可观测到衰减振荡的波形，如图 27－11 所示. 当 $\sin(\omega t + \varphi) = \pm 1$ 时，即 $\omega t + \varphi = \frac{1}{2} n\pi$（$n$ 为奇数）时，有

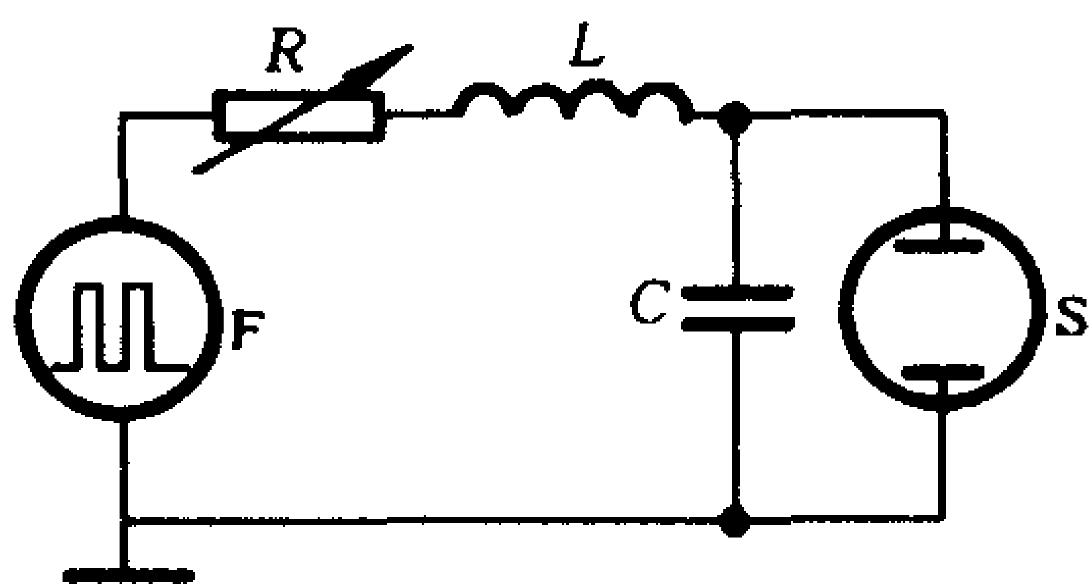


图 27－10

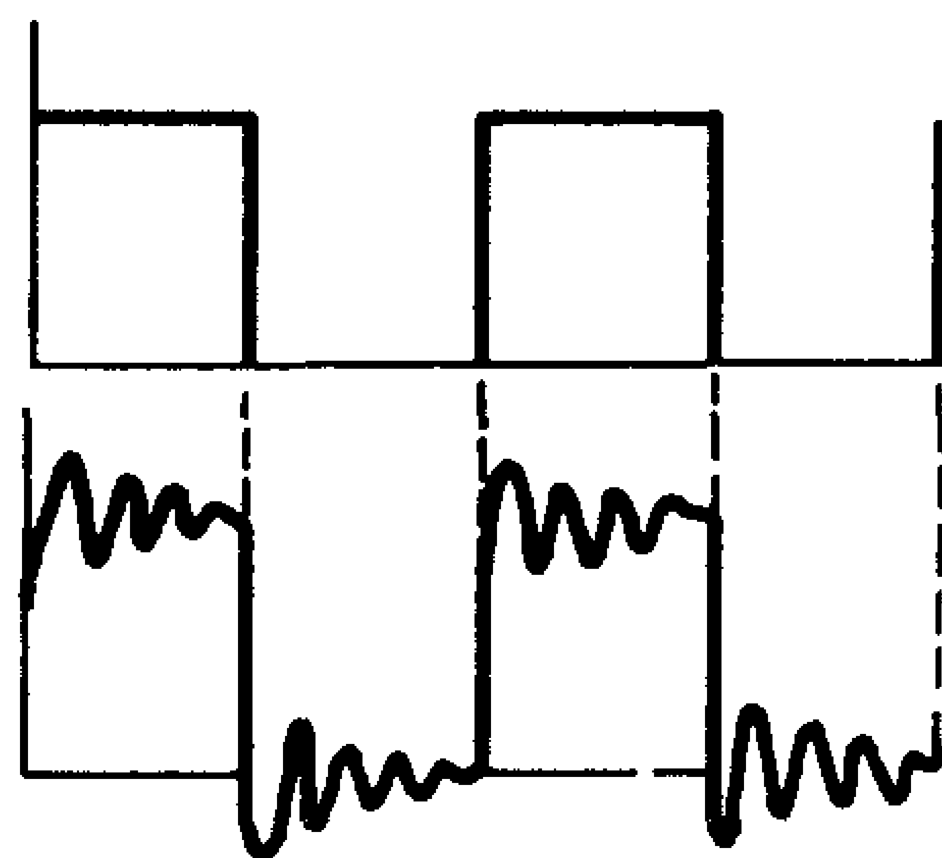


图 27－11 欠阻尼振荡

$$U_C = A e^{-\frac{t}{\tau}}$$

两侧取对数 $\ln U_C = \ln A\left(-\frac{1}{\tau}\right)t$

令 $y = \ln U_C$，可得直线方程

$$y = (\ln A) + \left(\frac{-1}{\tau}\right)t$$

测出几组（t、U_C）值，用作图法或线性回归法求出 $t - y(= \ln U_C)$ 直线的截距 a、斜率 b，而 $b = \frac{-1}{\tau}$，所以

$$\tau = -\frac{1}{b}.$$

注意:①测量时要准确找到 t 轴位置;

②t 应是满足 $\sin(\omega t+\varphi)=\pm 1$ 的值,即二相邻 $U_C=0$ 的中点;

③在理论上上述各 t 对应的 U_C 值并不正好是极大或极小值,但是二者相差甚少,测量时很难分辨清楚,所以取极大值、极小值便可.

预习思考题

1. τ 的物理意义是什么?写出 RL 和 RC 串联电路中的 τ 表示式及其使用的单位.

2. 通过电感线圈的电流和电容两端的电压能否突变?

3. LRC 串联电路中的 i、U_C、U_L 和 U_R 有哪三种状态?三种状态的特点是什么?

4. 在欠阻尼振荡时改变 LRC 串联电路中的 L 和 C,电流的波形将发生怎样变化?

5. 怎样用作图法求出 RC 串联电路中的 τ 值?

复习思考题

1. 用电压表测量 RC 串联电路的 τ 值与 RC 计算值比较,有否系统误差?产生的原因是什么?

2. 根据实验观察,说明三种状态的波形是怎样演变的?试从幅度、衰减形式和快慢等方面进行说明.

3. 如果要测量 RLC 串联电路中的 U_C 和 U_R,电路该怎样连接?

4. 用作图法求 τ 值或者 a 值,有什么优点?是否可用相关计算法?

[附记]

万能电桥测量 L 值的方法

QS18A 型万能电桥是最常用的交流电桥,测量电容时采用电

容比较电桥(即维恩电桥);测量电感时采用电容电感电桥(即麦克斯韦电桥). 它的基本误差(按量程最大值计算)如下表所示.

待测量	测量范围	基本误差
电容	1.0 pF~110 pF 100 pF~110 μF 100 μF~1100 μF	±2% ±1%±Δ* 供参考
电感	1.0 μH~11 μH 10 μH~110 μH	±5% ±2%±Δ
电感	100 μH~1.1 H 1 H~11 H 10 H~110 H	±1%±Δ ±2%±Δ 供参考
电阻	1 Ω~1.1 MΩ 1 MΩ~11 MΩ	±1%±Δ ±5%±Δ

* 表中"Δ"为刻线盘分度值的$\frac{1}{2}$.

QS18 A 型万能电桥的使用方法

[1]面板上各元件和控制旋钮的作用

(1)"被测"端钮 用来直接连接待测元件. 被测端钮"1"表示高电势,"2"为低电势,一般情况不必考虑.

(2)"外接"插孔 此插孔有两种用途:第一,在测量有极性的电容和铁芯电感时,如需要外部叠加直流偏置时,可通过此插孔连接于桥体,如图 27-12 所示;第二,当使用外部的音频振荡器信号时,可通过"外接"导线连到此插孔,施加到桥体(此时应把拨动开关"3"拨向"外"的位置).

(3)"拨动开关"此开关作用有二:

① 凡使用机内 1 kHz 振荡器时,应把此开关拨向"内 1 kHz"的位置.

② 当"外接"插孔施加外音频讯号时,应把此开关拨向"外"的位置(此时内含的 1 kHz 振荡器即停止工作).

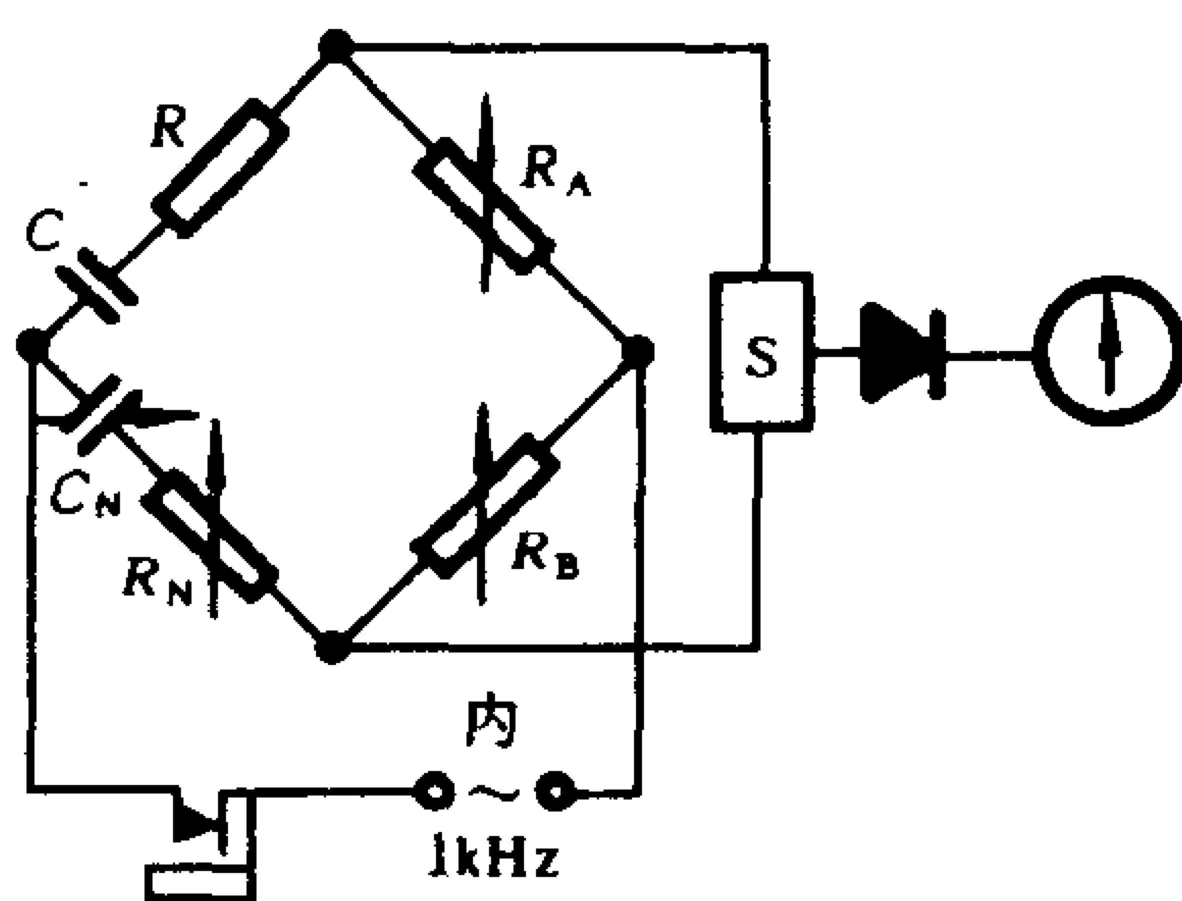


图 27-12　QS18A 线路

(4) "量程"开关　此开关是选择测量范围用，上面各挡的指示值是指电桥读数在满度时的最大值.

(5) "损耗倍率开关"　用来扩展损耗平衡的读数范围，在一般情况下测量空芯电感线圈时，开关放在"$Q\times1$"位置，测量小损耗电容器时，放在"$D\times0.01$"位置，测量损耗值较大的电容器时，放在"$D\times1$"位置.

(6) 指示电表　作为平衡指示用.

(7) "⊥"　为接壳端钮，它与本电桥的机壳相连.

(8) "灵敏度"调节旋钮　用来控制电桥放大器的放大倍数，在初始调节电桥平衡时，要降低灵敏度，使电表指示小于满刻度，在使用时应逐步增大灵敏度，进行电桥平衡调节.

(9) "读数"旋钮　电桥未平衡时应调节此二只读数盘，第一位读数盘的量级是 0.1，第二、第三位读数由连续可变电位器指示.

(10) "损耗微调"旋钮　用来提高损耗平衡的调节精细度，一般情况下，旋钮放在"0"位置.

(11) "损耗平衡"旋钮　待测元件即电容，或电感的损耗读数由此旋钮指示，将指示值乘以损耗倍率开关的指示值，便得到正确的损耗值.

(12) "测量选择"开关 QS18A 型万能电桥对电容、电感、电阻元件均能测量. 若测量电容，应将旋钮指示线指在"C"的位置，测量电感

放在“L”处，测量电阻分“$R>10$”Ω和“$R\leqslant10$”Ω两种，供选择，测试完毕切记把此旋钮放在“关”处，以减小机内干电池的损耗.

[2]电容的测量

(1) 把“测量选择”开关放在“C”位置，损耗倍率开关放在“$D\times0.01$”(一般电容器)或“$D\times1$”(大电解电容器)的位置1，“损耗平衡”旋钮指在“1”左右位置，“损耗微调”按逆时针旋到底.

(2) 把“量程”开关指在“100 pF”位置.

(3) 把“读数”的第一位开关指在“0”的位置，第二位刻线盘旋到“0.05”左右的位置.

(4) 转动“灵敏度”旋钮，使电表指针约指在30 μA左右的位置.

(5) 旋动“量程”开关，由“100 pF”开始……到“1 000 μF”，逐挡变换其量程，同时观察指示电表的动向，看变到哪一挡量程电表的指示最小，此时就把量程开关停留不动，再旋动“读数”的第二位刻线盘，使电表更加趋近零.

(6) 再将“灵敏度”增大，使指针小于满刻度(小于100 μA)，分别调节“损耗平衡”和第二位刻线盘，使指针仍指零或近于零，测量的值就能粗略地在刻线盘上读出.

(7) 根据粗测的电容值，适当调节“量程”和“读数”旋钮的位置，使“读数”的有效位数增多，再调节“损耗平衡”和“读数”两旋钮，直到电桥在最高，“灵敏度”时，电桥仍平衡为止，则

待测电容量 C_x =“量程”指示值×电桥的“读数”值.

待测电容损耗值 D_x = 损耗倍率指示×“损耗平衡”指示值.

(8) 若待测电容有一估计值，需精确测量例如被测电容为500 pF左右的电容器，则量程开关应放在1 000 pF的位置上. 按上述(1)、(3)、(4)、(6)、(7)步骤，则可迅速地测量其精确值.

[3]电感的测量

(1) 把“量程”开关放在 L 位置，损耗倍率放在“$Q\times1$”位置(指一般空气芯线圈，测量高 Q 值线圈时，损耗倍率放在“$D\times$

0.01”位置，测量铁芯电感放在“$D\times1$”位置，“损耗平衡”放在“1”左右位置“损耗微调”按逆时针旋到底.

(2) 把“量程”放在“10 μA”位置.

(3) 把“读数”的第一位旋钮放在“0”位置，第二位刻线盘旋到约“0.05”左右的位置.

(4) 将“灵敏度”旋钮逐步增大，使电表指针指在 30 μA 左右的位置.

(5) 旋动“量程”开关由“10 μH”、“100 μH”、…、100 H，逐挡变换，同时观察电表的动向，试看变到哪一挡，电表的指示最小，此时即停留在这一挡上，再旋动第二位刻线盘使电表更加指“0”.

(6) 再将“灵敏度”增大，使指针小于满刻度(小于 100 μA)，分别调节“损耗平衡”和第二刻线盘，使指针仍指零或近于零，待测量的值就能粗略地在刻度盘上读出.

根据粗测的电感值，适当调节“量程”和“读数”旋钮的位置，使“读数”的有效位数增多，再调节“损耗平衡”和“读数”两旋钮，直到电桥在最高“灵敏度”时仍平衡为止，则：

待测电感 L_x =“量程”开关指示值×电桥的“读数”值.

[4]电阻的测量

测量电阻只要将“量程”选择开关和“测量选择”开关放在适当的位置，调节二只“读数”旋钮，直到电桥在最高灵敏度时，仍然平衡，就可按下式求得电阻值：

R_x =“量程”指示值×电桥“读数”值

实验二十八　*LRC* 电路谐振特性的研究

目的

1. 研究和测量 *LRC* 串、并联电路的幅频特性；
2. 掌握幅频特性的测量方法；
3. 进一步理解回路 Q 值的物理意义.

仪器和用具

音频讯号发生器、交流毫伏表、电阻箱、电感线圈、标准电容箱、频率计、伏特计.

原理

在力学和电学实验中都观测过简谐振动和阻尼振动. 在力学的扭摆实验中，在外加的按正弦变化的策动力作用下，不仅使振动得以维持，而且策动力的频率对振动状态有很大的影响. 类似地，在电路中接入一电动势按正弦变化的电源，可经常地给电路补充能量以维持电振荡. 在此实验中是研究电源的频率对电路中振荡的影响.

一、*LRC* 串联电路

1. 回路中的电流与频率的关系(幅频特性)

见图 28－1(a)和(b)，图中 R' 由两部分组成，一部分是电感线圈的电阻，另一部分是与电容串联的等效损耗电阻，mV_1 为交流毫伏表，可监视信号源的输出电压，mV_2 也为交流毫伏表，用来测量 R 两端的交流电压值，f 为频率计.

LRC 交流回路中阻抗 Z 的大小为

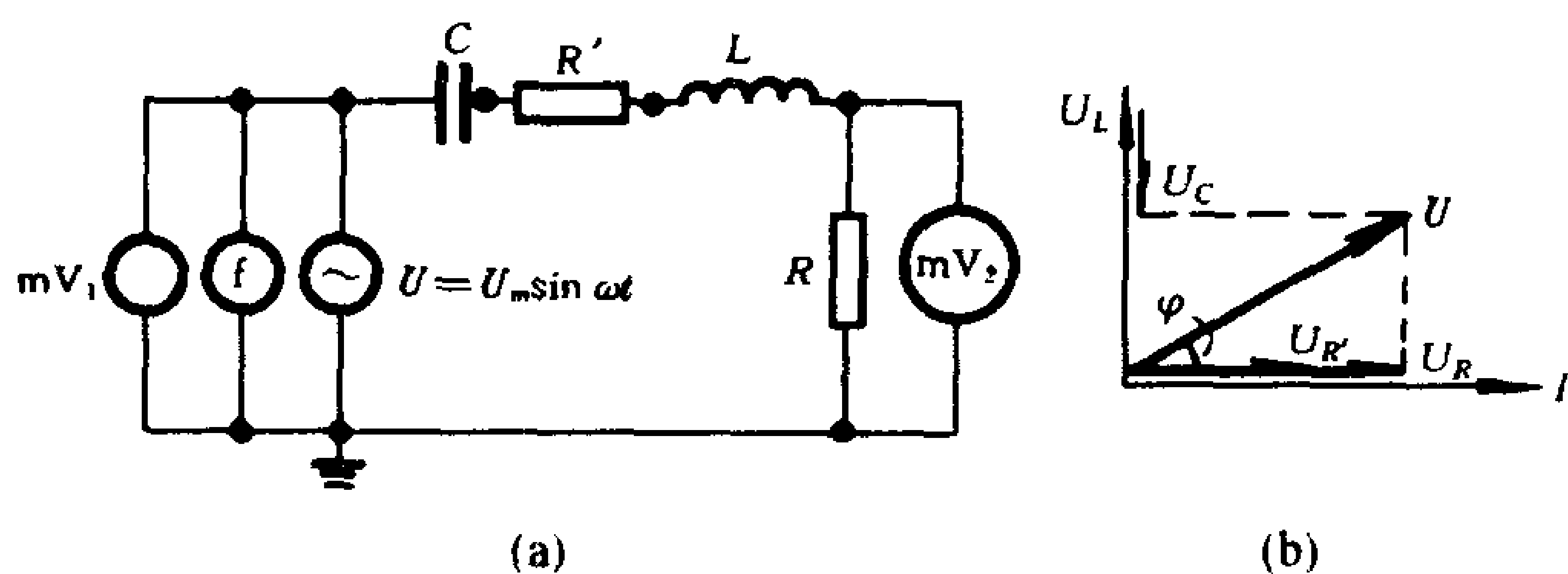


图 28－1　LRC 串联电路

$$|Z| = \sqrt{(R+R')^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \qquad (28-1)$$

对此回路总电压 U 与总电流 I 的相位差 φ，下式成立：

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_{R'} + U_R} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R' + R} \qquad (28-2)$$

或

$$\varphi = \mathrm{arctg}\left(\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R' + R}\right) \qquad (28-3)$$

回路中电流 I 为

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R+R')^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)}} \qquad (28-4)$$

当 $L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0$ 时，$\varphi = 0$，电流 I 最大. 令 ω_0 与 f_0 分别表示 $\varphi = 0$ 的角频率与频率，并称为谐振角频率与谐振频率，即

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (28-5)$$

如果取横坐标为 ω，纵坐标为 I，可得图 28－2 所示电流频率特性曲线.

2. 串联谐振电路的品质因数 Q

谐振时 $\varphi = 0$，$U_L = U_C$，即纯电感两端的电压与理想电容器两端的电压相等，并且

$$U_L = IL\omega_0 = \frac{U}{R+R'}L\omega_0 = \frac{L\omega_0}{R+R'}U$$

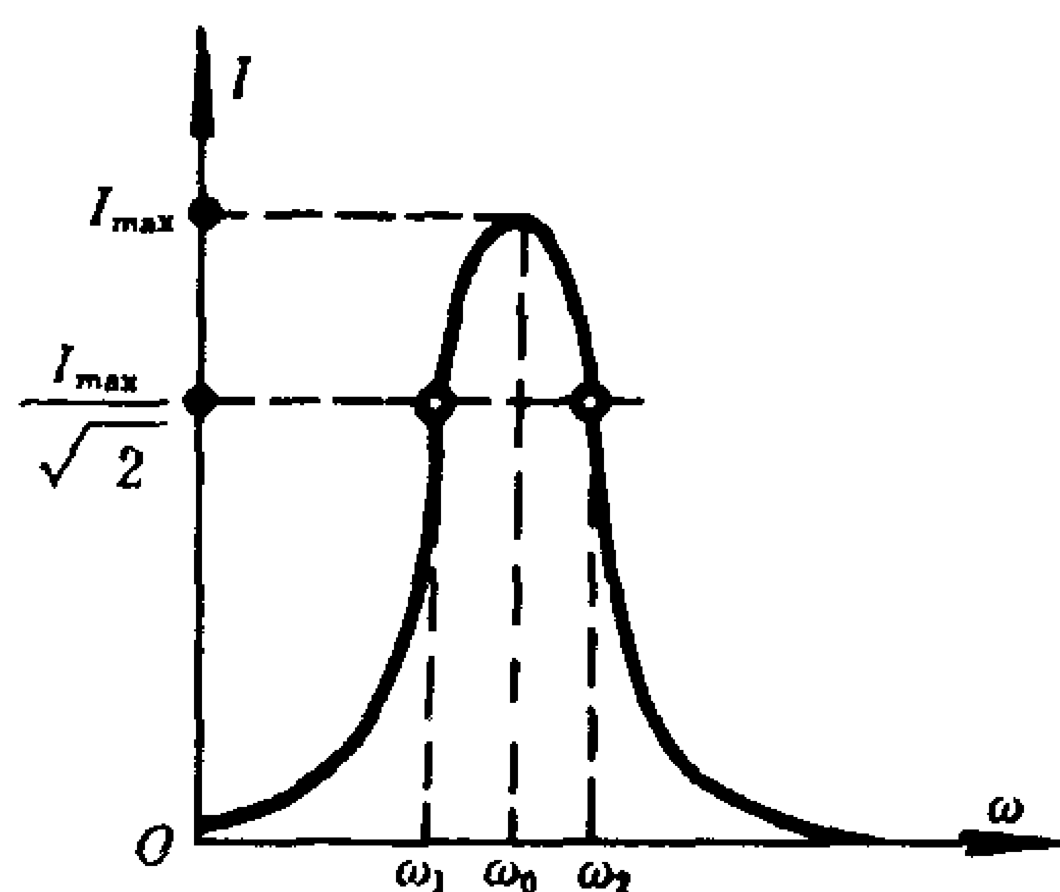


图 28-2 *LRC* 串联电路中的电流与频率关系曲线

又将式(28-5)代入上式,得

$$U_L = \sqrt{\frac{L}{(R+R')^2 C}}U \tag{28-6}$$

令

$$Q = \sqrt{\frac{L}{(R+R')^2 C}} \tag{28-7}$$

则

$$U_L = U_C = QU \tag{28-8}$$

Q 称为串联谐振电路的品质因数. 当 $Q \gg 1$ 时, U_L 和 U_C 都远大于信号源输出电压,这种现象称为 *LRC* 串联电路的电压谐振.

Q 的第一个意义是:电压谐振时,纯电感和理想电容器两端电压均为信号源电压的 Q 倍.

为了描述 $I-\omega$ 曲线的尖锐程度,常常考查 I 由极大值 I_{max} 下降到 $I_{max}/\sqrt{2} = 0.707I_{max}$ 时的带宽与谐振频率 ω_0 的关系. 对应此带宽边界的两个频率 ω_1 和 ω_2 均应满足

$$\frac{U}{\sqrt{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2 + (R+R')^2}} = \frac{U}{\sqrt{2}(R+R')}$$

由此可以得出

$$L\omega_2 - \frac{1}{C\omega_2} = R + R' \quad \left(L\omega > \frac{1}{C\omega}\text{时}\right) \qquad (28-9)$$

$$\frac{1}{C\omega_1} - L\omega_1 = R + R' \quad \left(L\omega < \frac{1}{C\omega}\text{时}\right) \qquad (28-10)$$

上面二式相减得

$$L(\omega_1 + \omega_2) = \frac{1}{C}\left(\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2}\right) = \frac{1}{C}\frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1\omega_2}$$

则

$$LC = \frac{1}{\omega_1\omega_2}$$

和式(28－5)相比较,可得

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2} \qquad (28-11)$$

又将式(28－9)与式(28－10)相加,整理后得出

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{2(R + R')C\omega_1\omega_2}{LC\omega_1\omega_2 + 1}$$

将 $\omega_1\omega_2 = \frac{1}{LC}$代入上式,得

$$\omega_2 - \omega_1 = (R + R')C\frac{1}{LC}$$

$$= \sqrt{\frac{(R + R')^2 C}{L}}\sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_0/Q$$

最后得出

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \qquad (28-12)$$

显然$(f_2 - f_1)$越小,曲线就越尖锐,可以讲

Q 的第二个意义是:它标志曲线的尖锐程度,即电路对频率的选择性,称 $\Delta f(= f_0/Q)$为通频带宽度.

3. Q 值的测量法

① (电压)谐振法　根据图 28－1(a)所示的线路,调节信号源的输出电压值,保证在各种不同频率时都相等,然后测量 R 两端的交流

电压，当 U_R 最大时，说明电路已处于谐振状态. 用交流电压表分别测量 L 和 C 两端的电压，则 $Q\left(=\frac{U_L}{U}=\frac{U_C}{U}\right)$值就可计算出来. 如果各种频率的输出信号幅度 U 值都是 1.00 V，那么测得的 U_L 或 U_C 值就是 Q 值的大小，这就是专门测量 Q 值的"Q"表原理.

② 频带宽度法　根据图 28－1(a)所示的线路，按照上述要求测量各种频率 f 时 R 两端的电压值，作出 U_R-f 曲线，找出 U_R 最大时的频率 $f(=f_0)$，即谐振频率，再求出 $U_R(f)=\frac{U_R(f_0)}{\sqrt{2}}$时的频率 f_1 和 f_2 值，根据(28－12)式计算出 Q 值的大小.

以上两种方法得到的 Q 值是一样的. 但是测量精确度各不相同. 电压谐振法宜用于高 Q 值(即 Q 值较大的)电路，频带宽度法适用于低 Q 值电路. 为了测到准确的 Q 值，要多次调到谐振，并用频率计仔细地测出每次的谐振频率，再取平均，最后得到比较可靠的谐振频率值.

二、LRC 串并混联电路——LR 和 C 并联电路

LR 和 C 并联电路如图 28－3 所示，图中 R_S 为信号源的内阻，R 由线圈内阻与外接电阻串联而成的合成电阻. 为了计算方便，采用复数法研究电路的规律. 根据并联电阻的计算. ab 两点间的导纳

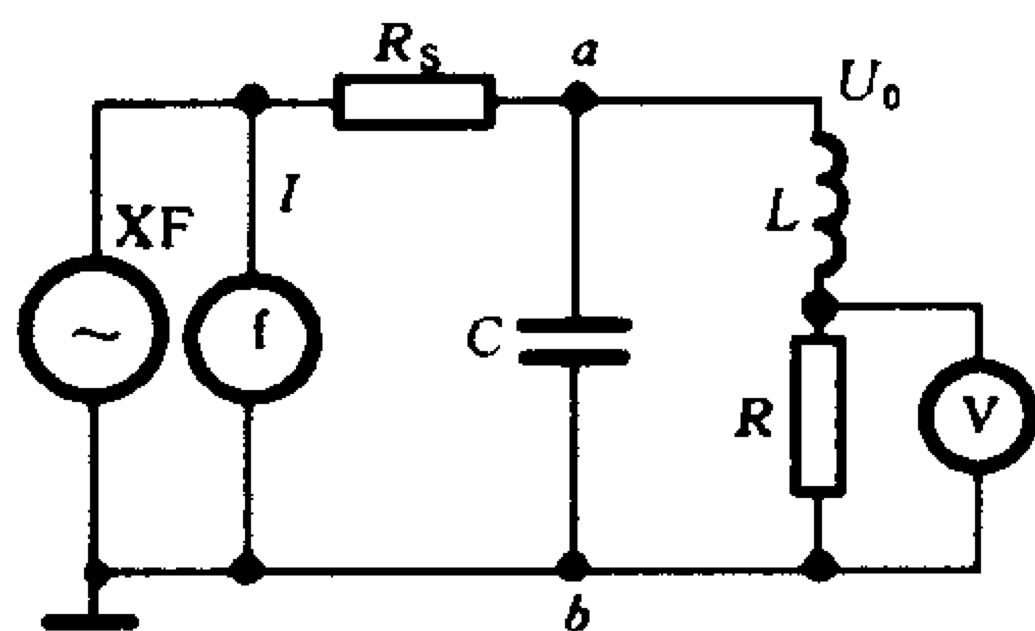


图 28－3　LRC 串并混联电路

$$\frac{1}{Z}=\frac{1}{R+L\omega\mathrm{j}}+C\omega\mathrm{j}=\frac{1-\omega^2LC+RC\omega\mathrm{j}}{R+L\omega\mathrm{j}}$$

因此

$$Z=\frac{R+L\omega\mathrm{j}}{1-\omega^2LC+RC\omega\mathrm{j}}=|Z|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} \qquad (28-13)$$

式中

$$|Z|=\sqrt{\frac{R^2+(L\omega)^2}{(1-\omega^2LC)^2+(RC\omega)^2}}$$

$$\begin{aligned}\varphi &= \arg\{R + L\omega \mathrm{j}\} - \arg\{1 - \omega^2 LC + RC\omega \mathrm{j}\} \\ &= \operatorname{arctg}\frac{L\omega}{R} - \operatorname{tg}^{-1}\frac{RC\omega}{1-\omega^2 LC} \\ &= \operatorname{arctg}\frac{L\omega - C\omega[R^2 + (L\omega)^2]^{①}}{R}\end{aligned}$$

当 $L\omega - C\omega[R^2 + (L\omega)^2] = 0$ 时，$\operatorname{tg}\varphi = 0$ 或者 $\varphi = 0$. 即当交流电的角频率满足关系式

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2}$$

时，信号源的输出电压也与输出电流同相. 同样，令 $(\omega_0)_p$ 与 $(f_0)_p$ 分别表示 $\varphi = 0$ 的角频率与频率，或者称为谐振角频率和谐振频率，a，b 两点的阻抗为 $|Z_p|$，则

$$(\omega_0)_p = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \qquad (28-14)$$

$$(f_0)_p = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \qquad (28-15)$$

当 $\frac{1}{LC} \gg \left(\frac{R}{L}\right)^2$ 时，LR 和 C 并联电路的谐振频率与 LRC 串联电路的谐振频率近似相等. 式(28－14)可改写成为

$$(\omega_0)_p = \omega_0\sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \qquad (28-16)$$

式中 $Q = \sqrt{\frac{L}{R^2 C}}$ 为 LR 与 C 并联电路的品质因数.

如果作 LR 与 C 并联电路的阻抗值－角频率(即 $|Z| - \omega$)曲线，如图 28－4 所示，不难看出它与串联谐振曲线非常相似，但存在相异之处. 图中 $(\omega_p)_m$ 为阻抗最大($|Z_{max}|$)时的角频率，根据求极值的方法可以得到

$$(\omega_p)_m = \sqrt{\frac{1}{LC}\sqrt{\frac{2CR^2}{L} + 1} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \qquad (28-17)$$

---

① 参阅附记.

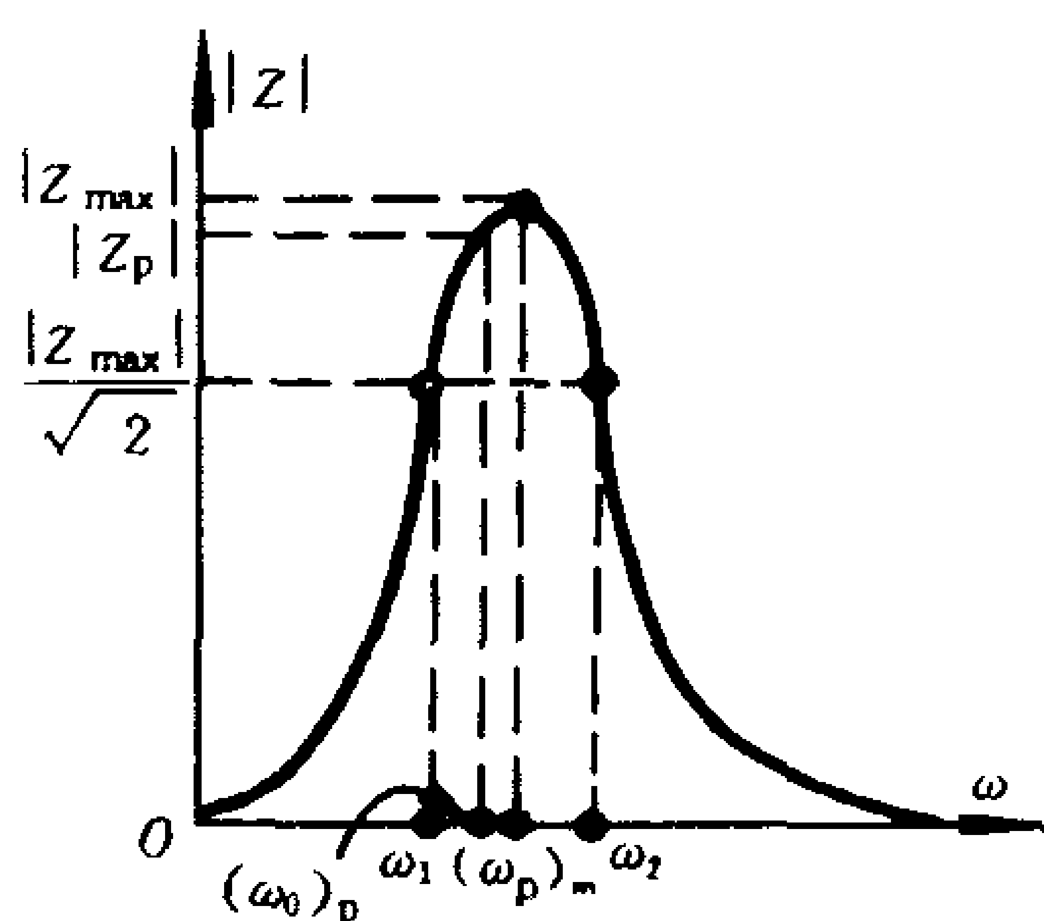


图 28－4 LR 与 C 并联电路的 |Z|－ω 曲线

利用幂级数展开上式得

$$(\omega_p)_m = \omega_0\left(1 - \frac{1}{4Q^4}\right) \qquad (28-18)$$

比较式(28－16)和式(28－18)可知，当 $Q \geqslant 1$ 时，$(\omega_p)_m$ 比 $(\omega_0)_p$ 更接近 ω_0，当 $Q > 5$ 时，$(\omega_p)_m$ 与 ω_0 的相对差异小于 0.04%，因而常取 $(\omega_p)_m$ 与 ω_0 相等去处理问题.

实验内容

1. 测量 *LRC* 串联电路的谐振特性

L 和 *C* 之值为实验室提供的器件的标称值，*R* 值自己确定(可以选取能使 *Q* 值在 15 上下的 *R* 值).

测量线路如图 28－5 所示．当 K 与"2"接通，调节 XF 的电压输出幅度，保证各种频率测量时的电压有效值都是 3.0V．当 K 与"1"接通，用交流毫伏表测量 *R* 的端电压.

计算电路的谐振频率 f_0，使频率从 f_0 向两侧扩展，每侧取 8～10种频率，对每一频率测电阻 *R* 的端电压 U_R．频率的改变范围应能使 U_R 从最大值降到最大值的十分之一以下.

每次频率的改变量不应相等，在 f_0 附近可以小些，或者使 U_R 的每次变化大体相似即可．这样取值是为了能将曲线中间突起部分测绘得准确些.

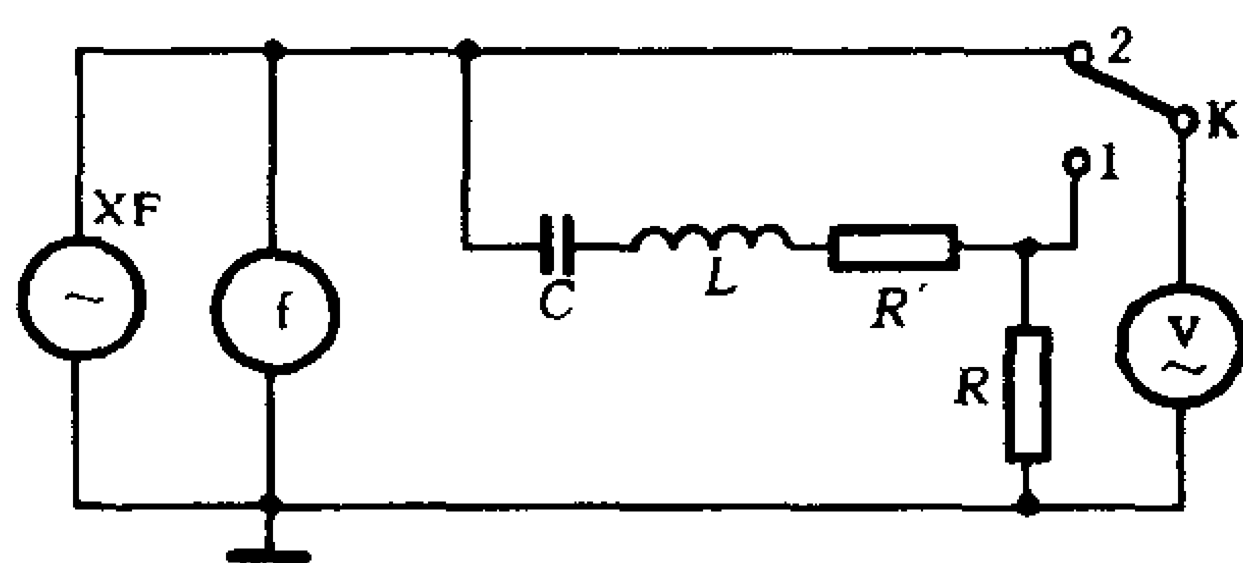


图 28－5　*LRC* 串联电路的测量线路

L　电感线圈，0.01H

C　标准电容器，0.1μF

R′　标准电感的内阻，其值由标牌上注明

R　外接高周波（交流）电阻箱，其值取（20.0－*R′*/Ω）Ω

XF　音频信号发生器

V　交流毫伏表，用来测量输出电压或 *R* 的端电压

f　频率计，用来测量 XF 输出的正弦波频率

在实验中测量谐振频率的实际值时，应是 U_R 最大值对应的频率，但是由于信号发生器的内阻较大，谐振时其端电压立刻下降，因而 *R* 两端电压不能马上快速上升，其上升的速度远不及信号源电压下降的快．所以寻找谐振点时，对应信号源端电压下降为极小值时的频率即为谐振频率的测得值．找到谐振频率后，再调信号源的输出电压为规定值．

绘制 I（或 U_R）－f 曲线．

增加 *R* 值使 *Q* 值降到 5 附近，重复上述测量和绘图．

2．分别用电压谐振法和频带宽度法确定 *Q* 值．

3．*LR* 与 *C* 并联电路的实验考查．

测量线路如图 28－6 所示．当 K 与“2”接通时，电压表测量 R_S 的端电压．注意：保持固定，取 3.0 V。当 K 与“1”接通时，电压表测量电容 *C* 的端电压．测量内容和步骤与 *LRC* 串联电路相同，最后作 $U_{ab}-f$ 曲线．

4．用最大电压法测量 *LR* 与 *C* 并联电路的 *Q* 值．

5．用频带宽度法计算 *LR* 与 *C* 并联电路的 *Q* 值．

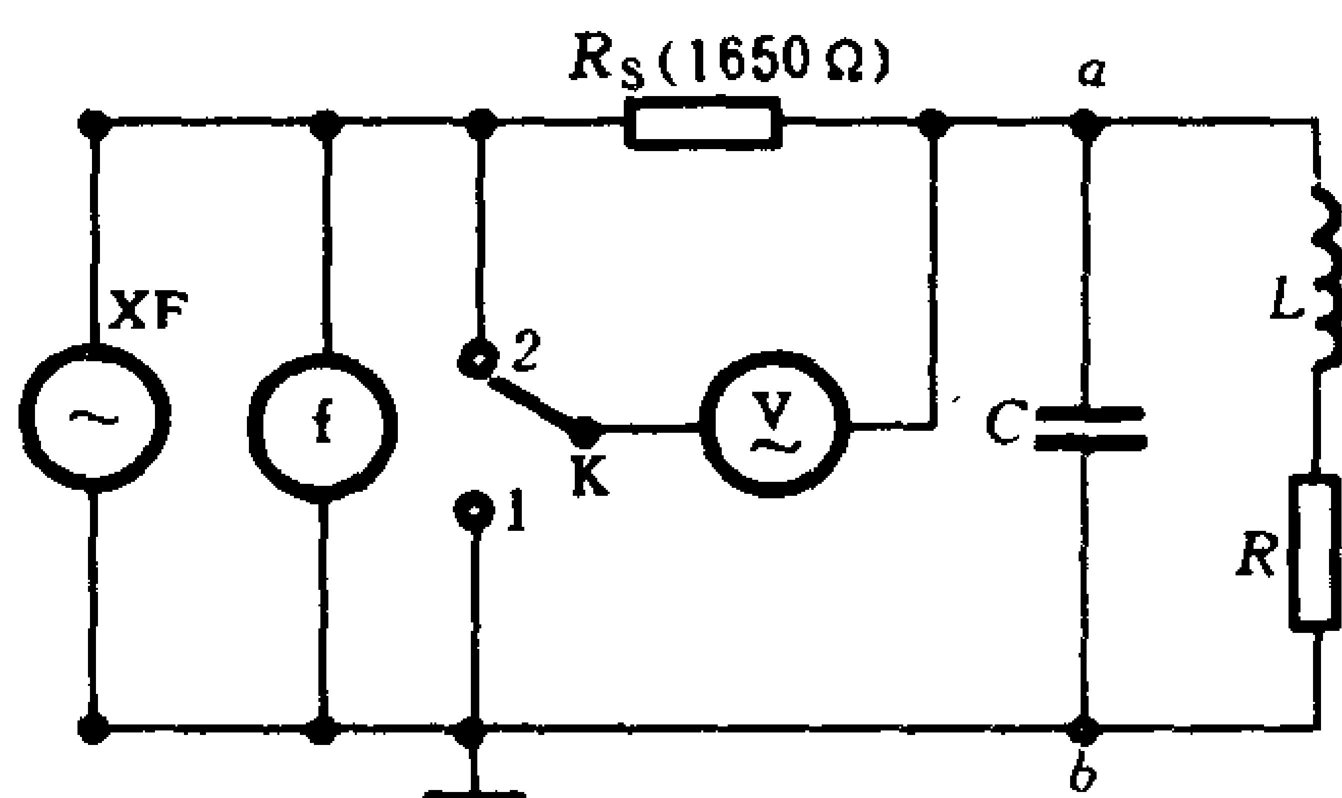


图 28-6　LR 与 C 并联电路的测量线路

预习思考题

1. 为什么说 LRC 串联电路的谐振是电压谐振？LR 与 C 并联电路的阻抗最大的条件是什么？

2. 测量串、并联电路的 Q 值有几种方法？

3. 测量 LRC 串联电路频率特性时，为什么要保持 XF 的输出电压大小恒定不变？

4. 测量 LR 与 C 并联电路频率特性时，为什么要保持 XF 的输出电流大小恒定不变？

5. 如何选取测量频率特性的 f？为什么？

6. LRC 串并联电路谐振时的特点是什么？串联谐振频率与并联谐振频率以及最大阻抗频率的意义是什么？

复习思考题

1. LRC 串联电路的 Q 值与哪些量有关，LR 与 C 并联电路的 Q 值与哪些量有关？根据实验数据回答.

2. 串联电路的 $I(\omega)-\omega$ 曲线和并联电路的 $U_{ab}(\omega)-\omega$ 曲线是否以 $\omega=\omega_0$ 和 $\omega=(\omega_p)_m$ 为对称轴？

3. 收音机里的陶瓷滤波器，其等效电路与 LRC 串联电路相当，若谐振频率是 465 kHz，Q 值等于 465. 问陶瓷滤波器的带宽等于多少？为什么称为滤波器？

4. 不同 Q 值的 $I(\omega)-\omega$ 曲线有什么特点？

5. 用谐振法和频带宽度法求得同一种线路的 Q 值是否相同，为什么？

6. LR 与 C 的并联电路中，$(\omega_0)_p=(\omega_p)_m$ 的条件是什么？相等时与串联谐振有何相同和相异之处？

［附记］

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{L\omega-C\omega[R^2+(L\omega)^2]}{R}\text{的推导}$$

由于

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{L\omega}{R}-\operatorname{arctg}\frac{RC\omega}{1-\omega^2LC}$$

令

$$\alpha=\operatorname{arctg}\frac{L\omega}{R}\Longrightarrow\operatorname{tg}\alpha=\frac{L\omega}{R}$$

$$\beta=\operatorname{arctg}^{-1}\frac{RC\omega}{1-\omega^2LC}\Longrightarrow\operatorname{tg}\beta=\frac{RC\omega}{1-\omega^2LC}$$

因此

$$\operatorname{tg}\varphi=\operatorname{tg}(\alpha-\beta)=\frac{\operatorname{tg}\alpha-\operatorname{tg}\beta}{1+\operatorname{tg}\alpha\cdot\operatorname{tg}\beta}$$

$$=\frac{\dfrac{L\omega}{R}-\dfrac{RC\omega}{1-\omega^2LC}}{1+\dfrac{L\omega}{R}\cdot\dfrac{RC\omega}{1-\omega^2LC}}$$

$$=\frac{L\omega-C\omega[R^2+(L\omega)^2]}{R}$$

所以

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{L\omega-C\omega[R^2+(L\omega)^2]}{R}$$

实验二十九　地磁场水平分量测量

目的

1. 学习测量地磁场水平分量的方法；
2. 了解正切电流计的原理；
3. 学习分析系统误差的方法

仪器和用具

亥姆霍兹线圈、罗盘、直流稳压电源、电阻箱、直流电流表、换向开关，水准器.

原理

1. 地磁场与地磁要素

地球是一个大磁体，地球本身及其周围空间存在着磁场叫做"地球磁场"又称地磁场，其主要部分是一个偶极场. 地心磁偶极子轴线与地球表面的两个交点称为地磁极，地磁的南(北)极实际上是地心磁偶极子的北(南)极，如图 29－1。地心磁偶极子的磁轴 N_mS_m 与地球的旋转轴 N S 斜交一个角度 θ_0，$\theta_0 \approx 11.5°$. 所以地磁极与地理极相近但不相同，地球磁场的强度和方向随地点、时间而发生变化.

地球表面任何一点的地磁场的磁感应强度矢量 $\boldsymbol{B}$ 具有一定的大小和方向. 在地理直角坐标系中如图 29－2 所示. O 点表示测量点，x 轴指向北，即为地理子午线(经线)的方向；y轴指向东，即为地理纬线

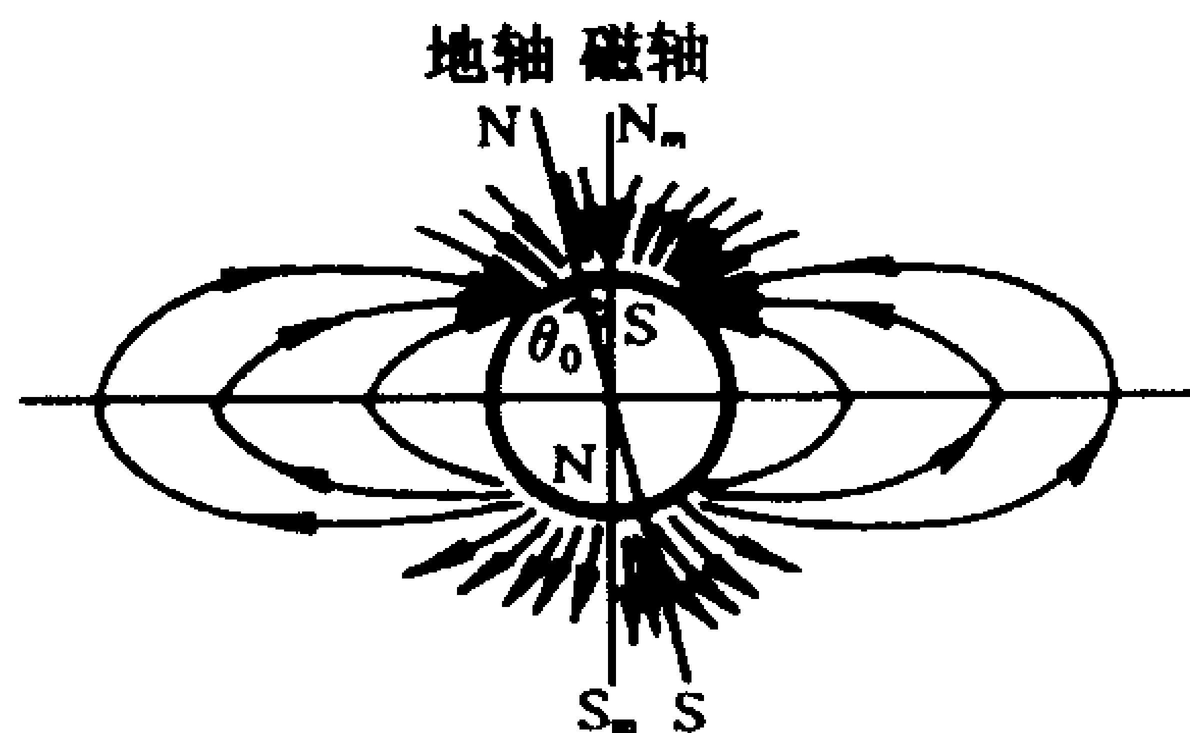


图 29－1　地球磁偶极子场的理想化情况

方向；z 轴垂直于地平面而指向地下. xOy 代表地平面. **B** 在 xOy 平面上的投影 $B_{/\!/}$ 称为水平分量，水平分量所指的方向就是磁针北极所指的方向，即磁子午线的方向；水平分量偏离地理真北极的角度 D 称为磁偏角，也就是磁子午线与地理子午线的夹角. 由地理子午线起算，磁偏角东偏为正，西偏为负. **B** 偏离水平面的角度 I 称为磁倾角. 在北半球的大部分地区磁针的 N 极向下倾，而在南半球，则磁针的 N 极向上仰，规定 N 极下倾为正，上仰为负. **B** 的水平分量 $B_{/\!/}$ 在 x、y 轴上的投影，分别称为北向分量 B_x 和东向分量 B_y；**B** 在 Z 轴上的投影 B_z 称为垂直分量. 故某一地点 O 的地磁要素有：(1)地磁场总磁感应强度 B，(2)磁倾角 I，(3)磁偏角 D，(4)水平分量 $B_{/\!/}$，(5)垂直分量 B_z，(6)北向分量 B_x，(7)东向分量 B_y.

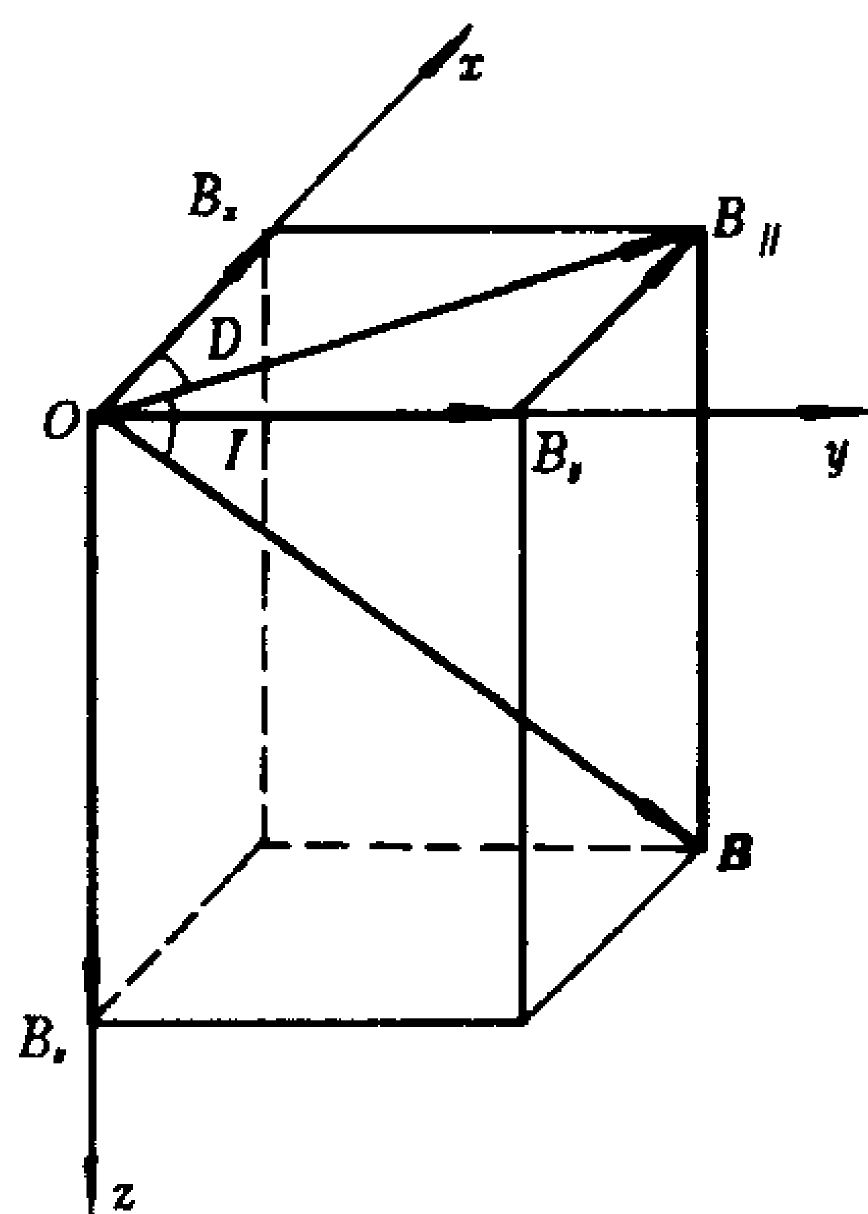


图 29－2　地磁要素

不难看出，它们是 **B** 在各个坐标体系中的坐标值，比如 B_x、B_y、B_z 就是 **B** 在直角坐标系中的坐标值，而 B_z、$B_{/\!/}$、D 和 D、$B_{/\!/}$、I 则分别是 **B** 在柱面坐标系和球坐标系中的坐标值，这三种坐标体系是彼此独立的，在它们之间，存在着如下的变换关系：

$$B_x = B_{/\!/} \cdot \cos D,$$
$$B_y = B_{/\!/} \cdot \sin D$$
$$B_z = B_{/\!/} \operatorname{tg} I$$
$$B_{/\!/}^2 = B_x^2 + B_y^2,$$
$$B^2 = B_{/\!/}^2 + B_z^2$$
$$B = B_{/\!/} \cdot \sec I = B_z \cdot \csc I;$$
$$\operatorname{tg} D = \frac{B_y}{B_x} \qquad (29-1)$$

如果知道其中独立的三个,其它四个就可以计算出来. 确定某一点的地磁场通常用磁偏角,磁倾角和水平分量 $B_{//}$ 三个独立要素.

2. 利用正切电流计原理,测定地磁场的水平分量 $B_{//}$

我们利用亥姆霍兹线圈制成一台正切电流计,亥姆霍兹线圈是一对相同的圆形线圈,彼此平行而且共轴,两线圈平行放置,绕行方向一致,相互串联,其线圈的间距等于线圈的半径.

在中心点附近较大范围内的磁场是相当均匀的,亥姆霍兹线圈在低磁场情况下既做磁化线圈,产生给定的磁场,又可做为弱磁场的计量基准,在较大的空间范围内,由于空间场的不均匀性引起的误差是很小的. 在亥姆霍兹线圈公共轴线的中点处,水平放置一罗盘,即构成了正切电流计,如图 29－3 所示.

在通电前,先将线圈平面与罗盘指针相平行,即线圈平面与地磁子午面一致. 然后在线圈中通以直流电,亥姆霍兹线圈产生的 B' 必和地磁场的水平分量 $B_{//}$ 相垂直,罗盘之中的磁针就在 B'、$B_{//}$ 两磁场所产生的磁力矩同时作用下偏离地磁子午面,与磁子午面成一定的角度 θ,如图 29－4 所示.

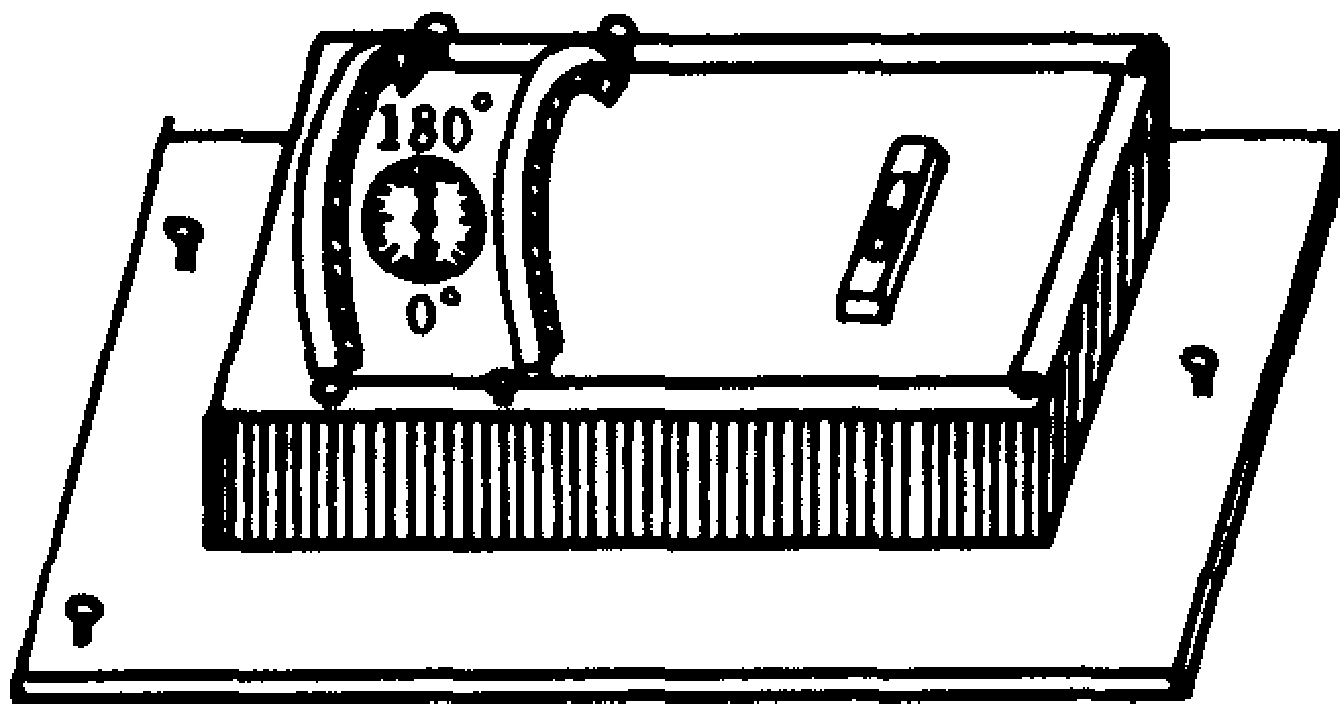


图 29－3

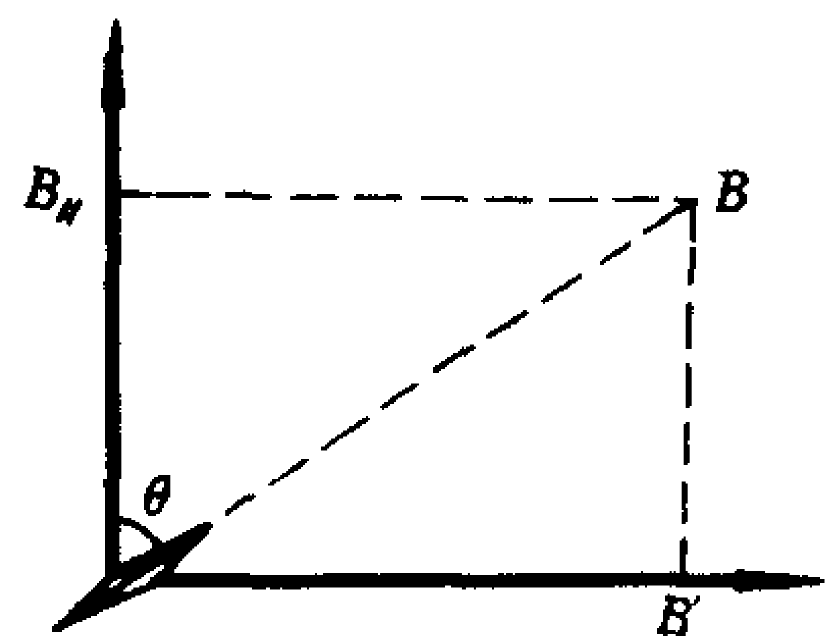


图 29－4

由图可知

$$\frac{B'}{B_{//}} = \mathrm{tg}\theta \qquad (29-2)$$

亥姆霍兹线圈公共轴线中点的磁场为

$$B' = \frac{\mu_0 NI}{\bar{R}} \cdot \frac{8}{5^{3/2}} \tag{29-3}$$

式中：N 为线圈的匝数，

$\bar{R}$ 为线圈的平均半径，

I 为流经线圈的电流强度，

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$

将(29－2)式代入(29－1)式得

$$B_{/\!/} = \frac{8\mu_0}{5^{3/2}} \cdot \frac{NI}{\bar{R}\,\text{tg}\,\theta} \tag{29-4}$$

即

$$I = \frac{5^{3/2}\bar{R}B_{/\!/}}{8\mu_0 N}\text{tg}\,\theta = K\text{tg}\,\theta \tag{29-5}$$

式中

$K = \frac{5^{3/2}\bar{R}B_{/\!/}}{8\mu_0 N}$. 对于同一个测量地点和给定的正切电流计，$B_{/\!/}$、$\bar{R}$ 和 N 均为不变值，故 K 为一常量.

由(29－5)式可知，流过电流计的电流强度与磁针偏转角 θ 的正切成正比. 因此这种电流计称为正切电流计. 若能测得流过正切电流计的电流 I，与罗盘指针的偏转角 θ，即能测得地磁的水平分量 $B_{/\!/}$ 值.

实验电路如图 29－5 所示.

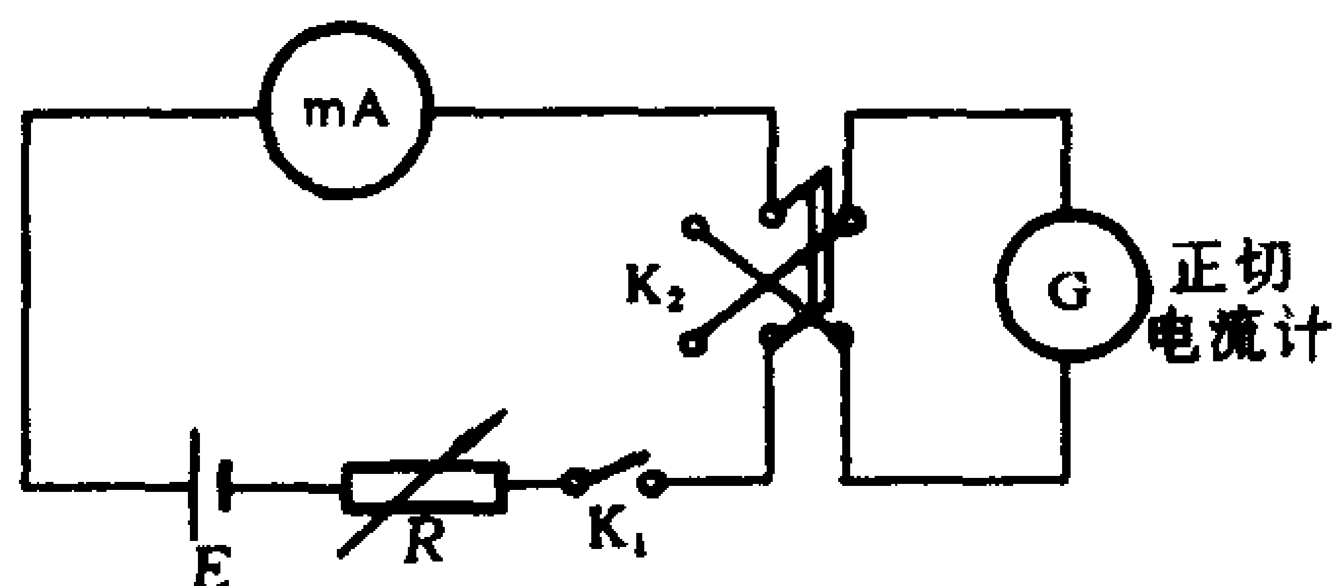


图 29－5

实验步骤

1. 按图 29－5 接线,将罗盘放置在亥姆赫兹线圈轴线中心位置,构成一台正切电流计.

2. 调节正切电流计底座的底脚螺丝使水准器气泡调至中间位置,即使罗盘位于水平位置,这样线圈平面就基本铅直了.

3. 旋转整个正切电流计装置使线圈平面与罗盘磁针相平行,即使线圈平面与地磁子午面一致,并使磁针的 N 极指向"0"刻度线,这样线圈通电后由线圈产生的磁场 B' 与地磁水平分量 $B_{/\!/}$ 相互垂直.

4. 调节电阻箱的阻值,改变通入正切电流计的电流值,从罗盘上读得磁针的偏转角 θ_1. 为了消除罗盘磁针偏心误差,需从罗盘上读得两个读数 θ_1、θ_2,如图 29－6 所示,通过换向开关使电流换向,同样在罗盘上又可读得两个值 θ_3、θ_4,则偏转角 $\theta=\frac{1}{4}(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_4)$.

5. 逐次增加电流值,可测得一系列的偏转角 θ 值. 将测得的电流 I 值与偏转角 θ 值作 $I-\operatorname{tg}\theta$ 图. 由图线求出其斜率 b 值,代入(29－5)式,即可求得地磁场水平分量

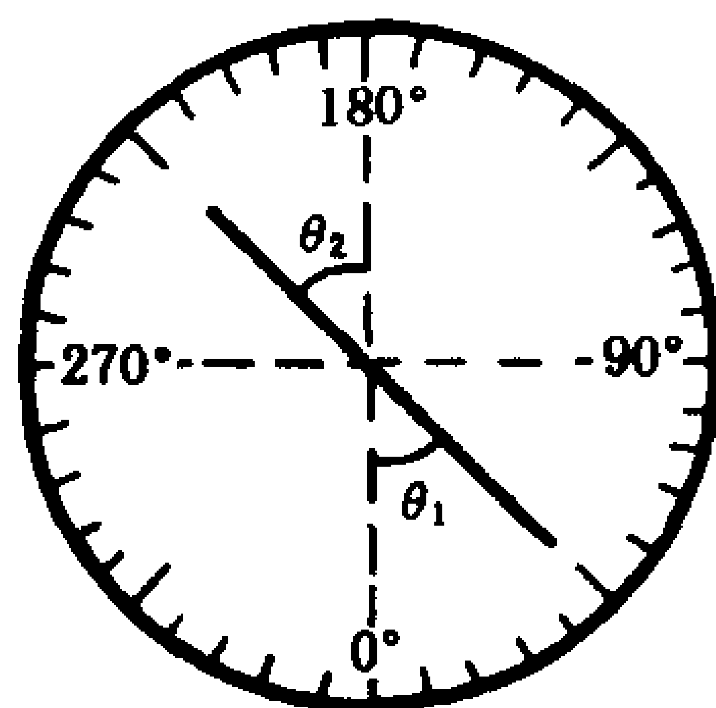


图 29－6

$$B_{/\!/}=\frac{8\mu_0 N}{5^{3/2}\overline{R}}\cdot b$$

或用最小二乘法,设 $x=\operatorname{tg}\theta$, $y=I$,求其相关系数,回归常数 a 和回归系数 b,然后求得地磁水平分量

$$B_{/\!/}=\frac{8\mu_0 N}{5^{3/2}\overline{R}}\cdot b$$

注意:

实验时将易产生磁场的仪器设备(如:安培表、通电的线圈等)

尽可能远离正切电流计,以免产生较大的误差.

预习思考题

1. 地球磁场的地磁要素有哪些? 它们之间有何关系?

2. 为什么要将正切电流计调水平,为什么线圈平面与罗盘磁针相平行? 罗盘指针不指零行吗?

3. 如何利用正切电流计测量地球的水平分量?

4. 如何用作图法或最小二乘法求得地磁的水平分量 $B_{//}$?

5. 正切电流计的电流值与磁针偏转角 θ 的大小应如何选择? 为什么?

复习思考题

1. 利用亥姆赫兹线圈与罗盘制成的正切电流计测量地磁的水平分量有什么优缺点?

2. 试分析本实验的误差,本实验中主要误差是偶然误差还是系统误差? 哪些误差消除了? 哪些误差还未消除? 这些误差应如何减少和消除?

3. 能否由一个垂直放置绕有 N 匝的圆形线圈和一个水平搁置在线圈中央的罗盘所组成的正切电流计来测量地磁场的水平分量 $B_{//}$?

4. 今有如下仪器与工具可供选择:冲击电流计、标准互感器、安培表、能作 180°自由旋转的匝数较多的、面积较大的线圈,换向开关等. 能否测量地磁场的水平分量和垂直分量:所依据的原理是什么? 画出测量电路图,并写出测量步骤与计算公式.

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝普通物理实验（二、电磁学部分） 第三版
作者＝杨述武主编
页数＝３１７
ＳＳ号＝１０３４６８４２
出版日期＝１９８５年１０月第１版

实验二十六　ＬＲＣ电路的稳态特性
实验二十七　ＬＲＣ电路的暂态过程研究
实验二十八　ＬＲＣ电路谐振特性的研究
实验二十九　地磁场水平分量测量